

UNIVERSIDADE ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIA HUMANAS, SOCIAIS, TECNOLÓGICAS E LETRAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL BACHARELADO

MARCOS GABRIEL SILVA RIBEIRO

**ANÁLISE MINERALÓGICA DA ADIÇÃO DE BENTONITA COMO BARREIRA
IMPERMEABILIZANTE EM SOLO DA ÁREA DE DESTINAÇÃO FINAL EM
IMPERATRIZ - MA**

Açailândia-MA

2025

MARCOS GABRIEL SILVA RIBEIRO

**ANÁLISE MINERALÓGICA DA ADIÇÃO DE BENTONITA COMO BARREIRA
IMPERMEABILIZANTE EM SOLO DA ÁREA DE DESTINAÇÃO FINAL EM
IMPERATRIZ - MA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Engenharia Civil Bacharelado do Centro de Ciência Humanas, Sociais, Tecnológicas e Letras da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão, *campus* Açailândia, como requisito para o grau de bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Lucas Manoel da Silva
Coorientador: Esp. Franklin Mota dos Santos

Açailândia-MA

2025

R484a

Ribeiro, Marcos Gabriel Silva

Análise mineralógica da adição de bentonita como barreira impermeabilizante em solo da área de destinação final em Imperatriz - MA / Marcos Gabriel Silva Ribeiro. – Açailândia: UEMASUL, 2025.

108 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, Açailândia, MA, 2025.

Orientador: Prof. Me. Lucas Manoel da Silva.

Coorientador: Prof. Esp. Franklin Mota dos Santos.

1. Barreira impermeabilizante. 2. Bentonita. 3. Permeabilidade. 4. Argilomineral.
I. Título.

CDU 631.4:666.322(812.1)

*Ficha Catalográfica elaborada por **Kenilce Reis** – Bibliotecária CRB 13/840*


MARCOS GABRIEL SILVA RIBEIRO

**ANÁLISE MINERALÓGICA DA ADIÇÃO DE BENTONITA COMO BARREIRA
IMPERMEABILIZANTE EM SOLO DA ÁREA DE DESTINAÇÃO FINAL EM
IMPERATRIZ-MA**


Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Engenharia Civil Bacharelado do Centro de Ciência Humanas, Sociais, Tecnológicas e Letras da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão, *campus* Açailândia, como requisito para o grau de bacharelado em Engenharia Civil.

Aprovado em 11 / 07 / 2025.


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **LUCAS MANOEL DA SILVA**
Data: 19/07/2025 18:37:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Lucas Manoel da Silva (Orientador)
UNIVERSIDADE ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO -
UEMASUL

Documento assinado digitalmente
 **ROBERT GUIMARAES SILVA**
Data: 22/07/2025 09:55:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Robert Guimarães Silva
INSTITUTO FEDERAL DO MARANHÃO - IFMA

Documento assinado digitalmente
 **BRUNO LUCIO MENESES NASCIMENTO**
Data: 22/07/2025 13:02:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Bruno Lucio Meneses Nascimento
UNIVERSIDADE ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO -
UEMASUL

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo estímulo, carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Expresso minha mais profunda gratidão à minha família, o inabalável alicerce que me moldou como pessoa. Vocês me guiaram pelos caminhos do conhecimento, oferecendo apoio incondicional e o ambiente propício para que eu pudesse alcançar cada meta traçada. Minha formação, tanto como homem quanto em minha educação, é um reflexo direto do amor e dos esforços de cada um de vocês.

À Taline, minha amada namorada, que é acima de tudo minha companheira leal e amiga para todas as horas. Seu apoio constante, seja com palavras ou atitudes, é o que me motiva e me ajuda a seguir em frente. Seu apoio e dedicação foram cruciais para minha formação. Também estendo minha gratidão à sua família, por serem um exemplo de dedicação, incentivo e um apoio fundamental.

Ao meu Orientador, Prof. Me. Lucas Manoel, meu muito obrigado. Desde os primeiros projetos, seu suporte em aprendizado e suas técnicas valiosas foram essenciais para o desenvolvimento de minhas pesquisas. Agradeço imensamente sua paciência e experiência compartilhada através de suas orientações acadêmicas.

Ao meu amigo e Coorientador, Franklin Mota, que me acompanhou desde o PIBIC, saiba que sem sua ajuda e parceria, a realização deste trabalho não teria sido possível. Minha gratidão por sua dedicação.

Um agradecimento especial à toda equipe da Franco Engenharia, que generosamente ofereceu o suporte completo, o espaço de seu laboratório e os equipamentos necessários, tornando a execução desta pesquisa uma realidade.

Por fim, minha gratidão à instituição UEMASUL, por ser um farol de oportunidades para seus acadêmicos e por incentivar seus discentes a sempre buscarem a excelência.

"Saber não é o bastante; precisamos aplicar. Querer não é o bastante; precisamos fazer."
Leonardo da Vinci

RESUMO

Aumento populacional e expansão urbana intensificam a pressão ambiental, especialmente na gestão de resíduos. No Brasil, 5.570 unidades operam para disposição de resíduos urbanos. Em 2023, a ABREMA registrou geração de 1 kg/hab.dia de RSU, somando 81 milhões de toneladas anuais. Apesar de 61% dos RSU coletados (43,8 milhões de toneladas) serem destinados a aterros sanitários adequados, 39% (27,9 milhões de toneladas) ainda são descartados em lixões e aterros controlados. O município de Imperatriz – MA utiliza um lixão municipal sem impermeabilização ou licença ambiental, o que reforça a necessidade de um aterro sanitário. O presente trabalho analisou as adições de teores de bentonita em 2%, 4% e 6% como barreira impermeabilizante em solo local, por meio de ensaios laboratoriais que mostraram o desempenho hidráulico e atuação mineralógica. A bentonita aumentou o índice de plasticidade (IP). O solo natural, classificado como silte de baixa compressibilidade (ML), tornou-se argila de baixa compressibilidade (CL) com bentonita. DRX identificou caulinita, illita e goetita no solo natural, e montmorilonita e lepidolita com bentonita. A montmorilonita, argilomineral expansivo, explica as mudanças no comportamento do solo e o aumento de sua atividade. Adsorção de azul de metileno mostrou aumento na atividade coloidal e superfície específica (SE). A classificação MCT do solo natural (LA') evoluiu para LA'-LG' e LG' com bentonita, indicando solo mais plástico com aumento de contração e penetração. Testes de permeabilidade demonstraram redução significativa (6, 46 e 48 vezes) no coeficiente de permeabilidade, conforme a classificação utilizada o solo alcançou a marca de praticamente impermeável com as adições de 4% e 6% de bentonita. Essa redução está correlacionada aos parâmetros reduzidos de índice de vazios e o aumento da superfície específica. Diante das análises, a bentonita é uma opção viável para reduzir a permeabilidade dos solos em aterros sanitários.

Palavras-Chave: Barreira impermeabilizante; Bentonita; Permeabilidade; Argilomineral.

ABSTRACT

Population growth and urban expansion intensify environmental pressure, especially concerning waste management. In Brazil, 5,570 operational units handle urban waste disposal. In 2023, ABREMA registered a generation of 1 kg/hab.day of MSW, totaling 81 million tons annually. Although 61% of collected MSW (43.8 million tons) is sent to adequate sanitary landfills, 39% (27.9 million tons) is still discarded in dumps and controlled landfills. The municipality of Imperatriz – MA utilizes a municipal dump without impermeabilization or an environmental license, which highlights the urgent need for a proper sanitary landfill. The present study analyzed the additions of bentonite at 2%, 4%, and 6% as an impermeabilizing barrier in local soil, through laboratory tests that showed its hydraulic performance and mineralogical action. Bentonite increased the plasticity index (PI). The natural soil, classified as low compressibility silt (ML), became low compressibility clay (CL) with bentonite. XRD identified kaolinite, illite, and goethite in the natural soil, and montmorillonite and lepidolite with bentonite. Montmorillonite, an expansive clay mineral, explains the changes in soil behavior and the increase in its activity. Methylene blue adsorption showed an increase in colloidal activity and specific surface area (SSA). The MCT classification of the natural soil (LA') evolved to LA'-LG' and LG' with bentonite, indicating a more plastic soil with increased shrinkage and penetration. Permeability tests demonstrated a significant reduction (6, 46, and 48 times) in the coefficient of permeability; according to the classification used, the soil reached a practically impermeable mark with the additions of 4% and 6% of bentonite. This reduction correlates with reduced void ratio parameters and increased specific surface area. Given these analyses, bentonite is a viable option for reducing soil permeability in sanitary landfills.

Keywords: Waterproofing barrier; Bentonite; Permeability; Clay mineral.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos tipos de resíduos	20
Quadro 2 – Distribuição de unidades de processamento de RSU (tipos de unidades, quantidade e percentual relativo)	22
Quadro 3 – Descrição dos tipos de argilominerais	35
Quadro 4 - Classificação de solos segundo SUCS	40
Quadro 5 – Classificação dos solos de acordo com TRB	42
Quadro 6 – Classificação dos resultados de CA	47
Quadro 7 - Classificação MCT conforme Nogami e Villibor	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Reserva e produção mundial de Bentonita em 2017.....	37
Tabela 2 – Grau de permeabilidade	51
Tabela 3 – Limite de consistência das amostras analisadas.....	63
Tabela 4 – Índice de atividade da amostra.....	65
Tabela 5 – Parametros geotécnicos das amostras compactadas natural e com diferentes teores de bentonita	66
Tabela 6 – Teor de matéria orgânica do solo de amostra	67
Tabela 7 – Determinação do pH da amostra.....	67
Tabela 8 – Classificações das fases por DRX.....	68
Tabela 9 - Dados da adsorção de Azul de metileno pelo método da mancha das amostras.....	69
Tabela 10 – Descrição do comportamento das amostras na execução do ensaio do método expedito das pastilhas	74
Tabela 11 – Condições e resultados da amostra em condição natural (I00).....	75
Tabela 12 – Condições e resultados da amostra com 2% de bentonita (I02)	76
Tabela 13 - Condições e resultados da amostra com 4% de bentonita (I04)	76
Tabela 14 – Condições e resultados da amostra com 6% de bentonita (I06)	76
Tabela 15 – Análise dos resultados e correlações	79
Tabela 16 - Dados do método expedito das pastilhas.....	103
Tabela 17 - Ensaio de Adsorção de Azul conforme a metodologia proposta por Fabbri (1994), conforme a norma francesa NF - 94 068 com amostra na condição natural	104
Tabela 18 - Ensaio de Adsorção de Azul conforme a metodologia proposta por Fabbri (1994), conforme a norma francesa NF - 94 068 com amostra na condição calcinada a 440°C	104
Tabela 19 – Identificação das fases mineralógicas encontradas nas amostras	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estimativa de disposição final no solo.....	23
Figura 2 – Detalhamento das unidades operantes em cada município do estado do Maranhão	24
Figura 3 – Unidades de disposição final por unidade de federação	25
Figura 4 – Lixão sede Imperatriz – MA.....	26
Figura 5 – Mapa pedológico com localização da construção do Aterro Sanitário	28
Figura 6 - Andamento da obra de execução do Aterro Sanitário.....	29
Figura 7 – Corte de seção de um aterro sanitário	31
Figura 8 – Representação das partículas de bentonita em processo de hidratação .	38
Figura 9 – Estrutura da argila bentonita in natura	39
Figura 10 - Gráfico de plasticidade para solos finos segundo Casagrande	41
Figura 11 – Esquema de operação de uma difração de Raios X.....	45
Figura 12 – Ábaco proposto por Fabri, onde caracteriza a atividade da fração de argila do solo.....	47
Figura 13 – Classificação MCT pelo Método das Pastilhas (NOGAMI et al., 1996)..	49
Figura 14 – Ensaio de adsorção de azul de metileno.....	55
Figura 15 – Procedimento de moldagem das pastilhas.....	56
Figura 16 – Procedimento de reabsorção das pastilhas	57
Figura 17 – Construção do permeâmetro de carga variável para a pesquisa	59
Figura 18 – Etapas de ensaio de permeabilidade	59
Figura 19 - Fluxograma para estudo mineralógico da pesquisa.....	60
Figura 20 – Curvas granulométricas da amostra com e sem defloculante.....	61
Figura 21 – Variação granulométrica do Luvissole.....	62
Figura 22 – Gráfico do limite de liquidez (LL) com e sem adição de bentonita	64
Figura 23 – Carta de Plasticidade do Sistema Unificado de Classificação de Solos.	64
Figura 24 – Curva de compactação para as amostra de solo e misturas.....	66
Figura 25 – Mineralogia por Difração de Raios X da amostra base e da bentonita ambas calcinada a 400°C	68
Figura 26 – Carta de influência da mineralogia	70
Figura 27 - Caracterização da atividade de toda a fração argila pelo método de Azul de Metileno.....	71
Figura 28 – Classificação da atividade da argila a partir do ábaco	72

Figura 29 – Determinação do grupo da metodologia MCT das amostras ensaiadas	73
Figura 30 – Gráfico comparativo Contração e Penetração	74
Figura 31 – Representação da permeabilidade em função do teor de bentonita, juntamente com a classificação de grau de permeabilidade de acordo com Lemen e Whitman (1969).....	77
Figura 32 – Superfície das adições de bentonita para as amostras.....	78
Figura 33 – Resultados do MCT x Permeabilidade x Teor de Bentonita.....	80
Figura 34 – Permeabilidade x Superfície Específica x Teor de Bentonita.....	81
Figura 35 – Análise comparativa entre DRX e Lautrin (1987).....	82
Figura 36 – Equipamentos para a realização do ensaio de azul de metileno	94
Figura 37 - Gráfico de classificação MCT	99
Figura 38 – Gráfico de classificação pelo método das pastilhas	100
Figura 39 – Classificação da amostra pelo Mapa pedológico	101
Figura 40 – DRX com amostra de solo natural.....	106
Figura 41 – DRX com amostra de bentonita	107
Figura 42 – Projeto para confecção do permeâmetro	108

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABETRE: Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE: Associação Brasileira De Empresas De Limpeza Pública E Resíduos Especiais

ABREMA: Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente

ASTM: American Society for Testing and Materials

CONDER: Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia

DRX: Difração de Raio X

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

GCL: Geosynthetic Clay Liner (Manta Geossintética)

IBGE: Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística

MCT: Miniatura Compactada Tropical

NBR: Norma Brasileira

NF: Norma Francesa

PGRS: Política de Gerenciamento de Resíduos Sólidos

PLANSAB: Plano Nacional de Saneamento Básico

PMGIRS: Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos

PNRS: Plano Nacional De Resíduos Sólidos

RECESA: Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental

SNIS: Sistema Nacional De Informações Sobre Saneamento

SUCS: Sistema Unificado De Classificação De Solos

TRB: Transportation Research Board

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	Objetivo geral.....	19
2.2	Objetivos específicos.....	19
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1	Resíduos sólidos.....	20
3.2	Destinação final	21
3.3	Diagnósticos de destinação final.....	22
3.3.1	Destinação final no Maranhão	24
3.3.2	Destinação final em Imperatriz – MA.....	25
3.4	Projeto aterro sanitário em Imperatriz – MA	26
3.4.1	Detalhes do projeto e infraestrutura.....	27
3.4.2	Andamento atual da implantação do aterro sanitário em Imperatriz – MA ...	28
3.5	Métodos de tratamento de RSU.....	29
3.5.1	Aterro Sanitário.....	29
3.6	Processo executivo do aterro sanitário.....	30
3.7	Barreira impermeabilizante da camada de base.....	31
3.7.1	Barreira de argilas naturais.....	32
3.7.2	Barreira de solos argilosos compactados	33
3.7.3	Barreira com uso de materiais sintéticos	34
3.8	Argilominerais.....	34
3.8.1	Argila Bentonita	37
3.9	Classificações geotécnicas	39
3.9.1	Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).....	40
3.9.2	Classificação TBR (Transportation Research Board)	42
3.9.3	Difração de Raio X.....	44
3.9.4	Adsorção de Azul de Metileno	46
3.9.5	Classificação MCT pelo Método das Pastilhas de Nogami e Villibor (1994). 48	
3.10	Permeabilidade dos solos	49
4	MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.1	Atividade de campo.....	52
4.1.1	Amostragem de solo.....	52

4.1.2	Amostragem	52
4.1.2	Amostra de bentonita.....	53
4.2	Ensaio de laboratório	53
4.2.1	Coleta e preparação das amostras.....	53
4.2.2	Caracterização das amostras	53
4.2.3	Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno pelo Método da Mancha (Fabbri, 1994)	54
4.2.4	Classificação MCT pelo Método das Expedito Pastilhas Nogami e Villibor (1994)	56
4.2.5	Técnica de Difração de Raio X (DRX)	57
4.2.6	Ensaio de Permeabilidade à Carga Variável	58
4.3	Método de análise de dados	60
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1	Caracterização das amostras	61
5.1.1	Granulometria Associada a Sedimentação.....	61
5.1.2	Limite de Consistência.....	63
5.1.3	Compatação a Energia de Proctor Normal	66
5.1.4	Teor de Matéria Orgânica.....	67
5.1.5	Grau de Acidez	67
5.1.6	Mineralogia por Difração de Raios X	68
5.1.7	Adsorção de Azul Metileno pelo Método da Mancha.....	69
5.2	Método expedito das pastilhas.....	73
5.3	Permeabilidade à carga variável	75
5.4	Correlação dos resultados	78
6	CONCLUSÃO.....	83
6.1	Recomendações	84
	REFERÊNCIAS.....	85
	ANEXO A – AVALIAÇÃO DA ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO PELO MÉTODO DA MANCHA.....	93
	ANEXO B – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO MINIATURA COMPACTADA TROPICAL - MCT	98
	ANEXO C – MAPA PEDOLÓGICO DO MUNICÍPIO DE IMPERATRIZ – MA	101
	APÊNDICE A – CLASSIFICAÇÃO MCT PELO MÉTODO EXPEDITO DAS PASTILHAS	103

APÊNDICE B – AVALIAÇÃO DA ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO PELO MÉTODO DA MANCHA	104
APÊNDICE C – DIFRAÇÃO DE RAIOS X	106
APÊNDICE D – PROJETO PERMEÂMETRO	108

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional e a expansão urbana, a pressão sobre o meio ambiente aumenta significativamente, isso se manifesta tanto no consumo de recursos naturais quanto no desafio da gestão de resíduos. No Brasil, existem 5.570 unidades de disposição de resíduos urbanos em operação. Segundo dados do SNIS (2023), a população brasileira gera, em média, 0,98 kg de lixo por habitante por dia. Essa taxa resulta em um volume diário de aproximadamente 199 mil toneladas de resíduos, totalizando cerca de 63,8 milhões de toneladas anuais.

Segundo a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA, 2024), o Brasil no ano de 2023, apresentou uma geração, em média, por habitante, de cerca de 1 kg de Resíduos Sólidos Urbano (RSU) por dia, o que totaliza uma estimativa de produção anual 81 milhões de toneladas de RSU. Esse dado apresenta um aumento consideravelmente discreto comparado com o ano anterior.

No Brasil, 61% dos RSUs coletados, cerca de 43,8 milhões de toneladas, são destinados a localizações de aterros sanitários, que são considerados ambientalmente adequados. Entretanto, os demais 39% (27,9 milhões de toneladas) ainda são descartados inadequadamente, em destinos de lixões e aterros controlados (ABRELPE, 2023).

O déficit de unidades de aterros sanitários caracteriza-se como uma problemática que abrange os âmbitos sanitários, sociais e ambientais, sendo comumente dispendiosa resolução. Estima-se que em 2022 mais de 33 milhões de resíduos sólidos urbanos tiveram destino final inadequado, o que totaliza aproximadamente 40% de todo lixo gerado no país (ABREMA, 2024).

Partindo de um cenário regional (Maranhão), e adentrando no cenário municipal (Imperatriz – MA), é possível observar o preocupante cenário atual, visto que o Estado conta somente 6 unidades de destinação final adequado, e nenhuma delas encontra-se no município de Imperatriz (SNIS, 2023).

Diante disso, por meio de uma coleta de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2023), notou-se que o município de Imperatriz – MA possui uma destinação final classificada como Lixão Municipal, sem impermeabilização da base e, também, sem licença ambiental para operação. Este tipo de operação reflete em um despejo inapropriado, o que reforça a necessidade de uma disposição adequada a partir de implantação de aterro sanitário.

Conforme Carvalho et al. (2015), as unidades de aterros sanitários devem dispor de características geotécnicas específicas, como a baixa permeabilidade, para evitar que lixiviados percolem pelo solo e ocasionalmente atingir o lençol freático. Diante disso, os solos recomendados com essas características são os argilosos, pois apresentam baixa permeabilidade e por isso são considerados solos ideais para a utilização em barreiras impermeabilizantes na base e de cobertura de aterros sanitários.

É importante que a camada de base de aterro retenha ou minimize o escoamento do lixiviado, evitando a contaminação dos solos e das águas subterrâneas (lençóis freáticos), e o uso de barreiras argilosas é uma alternativa viável devido ao baixo coeficiente de permeabilidade das argilas, característica preciosa para camada base de impermeabilização (GUIMARÃES et al., 2020).

Em casos onde a jazida do solo disponível não apresentar condições de permeabilidade adequada para a implantação como camada base de aterro sanitário é necessário a implantação de aditivos para a redução deste índice, para isso recomenda-se a adição de argilas comerciais, como por exemplo a bentonita (LEME, 2013).

Diante do problema apresentado na região municipal, observou-se a demanda de implantação de um aterro sanitário na localidade de Imperatriz – MA, contudo, quais os critérios devem ser analisados para implantar um aterro sanitário no local?

Portanto, esta pesquisa buscou analisar a aplicabilidade de camada de base e de cobertura impermeabilizante, observando o desempenho hidráulico usando a amostra local como referência e com adição de teores de bentonita (2%, 4% e 6%). Além disso, para melhor esclarecimento desta aplicabilidade, este trabalho buscou interpretar a atuação mineralógica nesta combinação, visando a compreensão da alteração de comportamento geotécnico das amostras.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar e compreender a adição de argilominerais de bentonita em solos do Lixão Municipal de Imperatriz – MA como camada de base impermeabilizante para uso em aterro sanitário.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar a atividade da redução de permeabilidade do solo da região do entorno do Lixão Municipal de Imperatriz – MA com adição de teores de argila bentonita;
- Caracterizar os minerais da argila bentonita e do solo da região do entorno do Lixão Municipal de Imperatriz a partir da análise de difração de raios X (DRX);
- Verificar a atividade coloidal através da técnica de adsorção de azul metileno e análise dos limites de Attemberg;
- Classificar os solos a partir da metodologia Miniatura Compactada Tropical (MCT) comparando com o comportamento esperado para tal classe.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Resíduos sólidos

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) resultam de várias atividades executadas nos municípios, possuindo uma composição bastante diversificada. Em casos onde o descarte é realizado de forma inadequada, devido a exposição de substâncias e materiais degradáveis, acarreta perigos a saúde humana e para o meio ambiente (SILVA et al., 2015).

Conforme a norma NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos incluem materiais sólidos, semissólidos ou semilíquidos gerados por atividades comerciais, residenciais, industriais, agrícolas, serviços de saúde, conservação urbana e limpeza de ruas.

Adicionalmente, essa definição inclui lodos produzidos em estações de tratamento de água e sistemas de controle de poluição, além de certos líquidos que não podem ser descartados na rede pública de esgotos ou em corpos de água, devido a questões de segurança e fatores técnicos que inviabilizem seu tratamento com a tecnologia disponível (ABNT, 2004).

No que diz respeito a origem, a Lei Federal nº 12.305/10 classifica os resíduos sólidos em, conforme o Quadro 1:

Quadro 1 - Classificação dos tipos de resíduos

Tipo de Resíduo	Descrição
Resíduos domiciliares (RSD)	São aqueles originados de tarefas domésticas em residências do território urbano.
Resíduos de limpeza urbana	São aqueles originados de varrição, higienização de ruas e, outros serviços de limpeza urbana.
Resíduos sólidos urbanos (RSU)	É a soma dos resíduos de limpeza urbana e domiciliares.

Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico	São aqueles que são produzidos nas ações de saneamento básico, com exceção dos resíduos sólidos urbanos.
Resíduos industriais	São os descartes produzidos de serviços industriais, com exceção dos resíduos sólidos urbanos.
Resíduos de serviços de saúde	São os tipos de resíduos produzidos nos estabelecimentos de saúde.
Resíduos da construção civil (RCS)	São aqueles produzidos em construções, reparos, reformas, e demolições de empreendimentos, ou seja, construção civil em geral, incluindo os oriundos de escavações de terrenos.

Fonte: Adaptado da Lei Federal nº 12.305/10.

3.2 Destinação final

Com base no Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, que é um documento que promove um conjunto de ações para o manejo adequado dos resíduos, diversos aspectos são considerados para o manejo adequado da destinação final, sendo considerado aspectos desde a geração, separação, acondicionamento, transporte, coleta, tratamento até a disposição e destinação final. O objetivo é minimizar os riscos ao meio ambiente e à saúde pública (SILVA et al., 2021).

A existência de lixões a céu aberto permanece uma realidade frequente em muitas cidades brasileiras. O destino final dos resíduos sólidos coletados em diferentes municípios podem variar conforme a Política de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) implementada em cada local; logo, em cidades que não possuem essa política, é razoável inferir que o destino final dos resíduos se dá em um lixão.

O lixão representa uma maneira de descarte final de resíduos sólidos urbanos, sendo definido pela simples deposição sobre o solo, sem seguir critérios técnicos e sem adotar medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. Esse tipo de descarte é conhecido como descarga a céu aberto caracterizado como inadequado e ilegal de acordo com a legislação brasileira (LANZA et al., 2010).

A alternativa para o curso final dos resíduos, que comumente são aplicadas em diversos locais são os aterros sanitários. Como boa parte das cidades brasileiras não possuem um sistema de coleta seletiva com a separação de componentes para a reciclagem, a presença de lixo reciclável junto aos resíduos é imprescindível e conseqüentemente são levados para os aterros, elevando o volume de material depositado visto que o processo de degradação biológica é maior quando comparado com matéria orgânica (MELO et al, 2016).

3.3 Diagnósticos de destinação final

De acordo com SNIS (2023), 5.851 instalações de tratamento de resíduos sólidos estavam em funcionamento no Brasil em 2022. Essas unidades receberam um total de 101,2 milhões de toneladas de resíduos sólidos, dos quais 70,1 milhões de toneladas foram destinadas a locais de disposição no solo, incluindo aterros sanitários (49,2 milhões de toneladas), lixões (10,4 milhões de toneladas) e aterros controlados (10,5 milhões de toneladas). O Quadro 2 mostra os tipos de unidades de processamento de RSU em operação nos municípios do Brasil.

Quadro 2 – Distribuição de unidades de processamento de RSU (tipos de unidades, quantidade e percentual relativo)

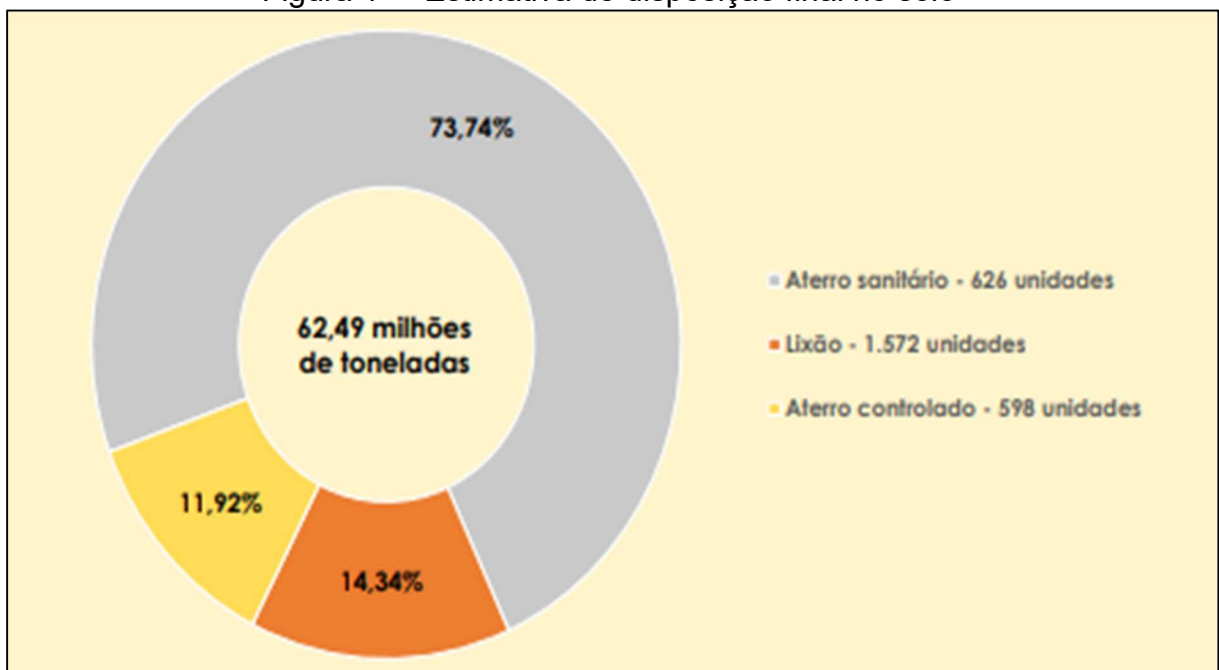
Tipos de Unidades de Processamento de RSU em Operação	Quant. De Municípios	Percentual (%)
Unidade de triagem (galpão ou usina)	1972	33,7
Lixão	1572	26,9
Aterro sanitário	626	10,7
Aterro controlado	598	10,2
Unidade de transbordo (RDO+RPU)	289	4,9
Área de transbordo e triagem de RCC e volumosos (ATT)	128	2,2
Aterro de RCC (aterros inertes)	90	1,5
Unidade de manejo de galhadas e podas	87	1,5

Unidade de compostagem (pátio ou usina)	76	1,3
Área de reciclagem de RCC (Resíduos de Construção Civil)	59	1
Unidade de tratamento por micro ondas ou autoclave	26	0,4
Vala específica de RSS (Resíduos Serviços de Saúde)	17	0,3
Unidade de tratamento por incineração	16	0,3
Coprocessamento	6	0,1
Queima em forno de qualquer tipo	0	0
Outra	289	4,9

Fonte: Adaptado de SNIS (2023).

Dos meios de processamento de RSU, é importante destacar os métodos que são de disposição final em solo. Estima-se 62,5 milhões de toneladas por ano de massa de RSU disposta em aterro sanitário, aterro controlado e lixão. (SNIS, 2023). A Figura 1 destaca a distribuição de unidades entre os três tipos de disposição final.

Figura 1 – Estimativa de disposição final no solo

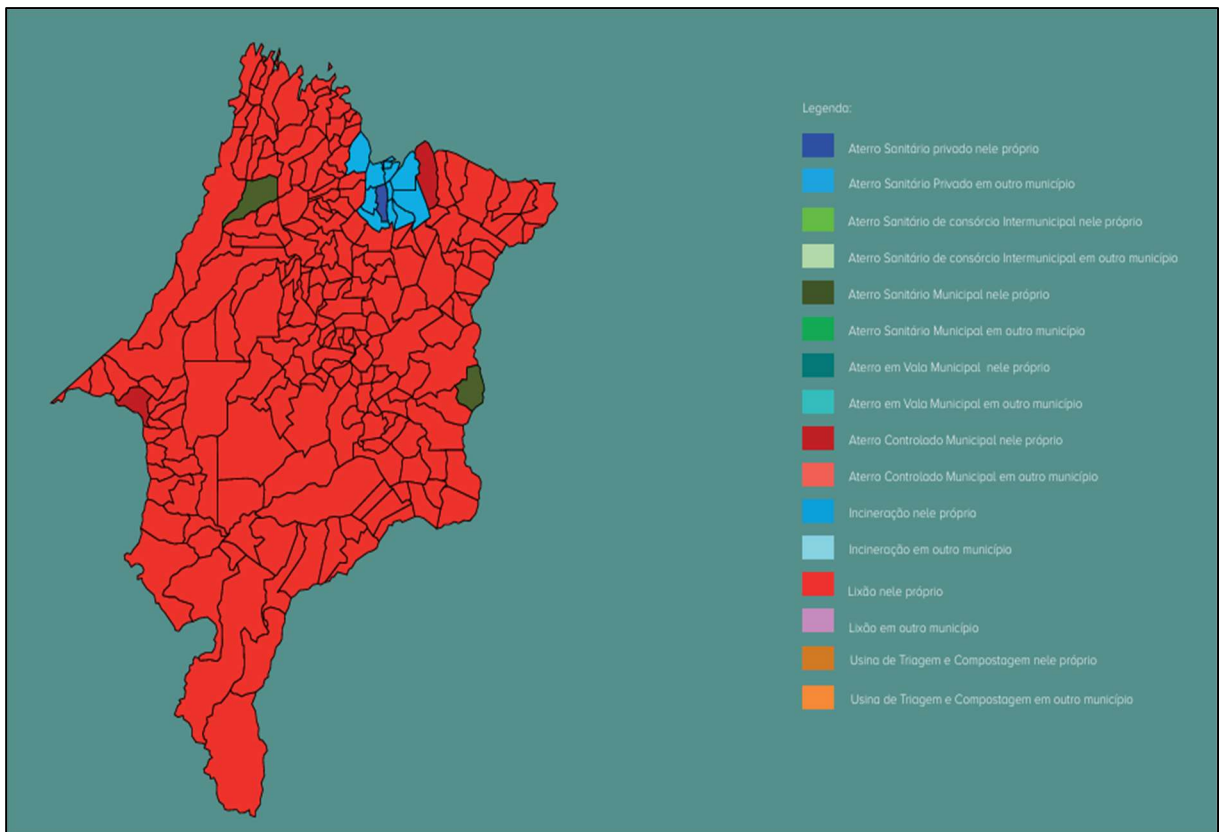


Fonte: SNIS (2023).

3.3.1 Destinação final no Maranhão

O estado do Maranhão, de acordo com ABETRE (2020), aponta que 89% dos municípios ainda efetuam a disposição dos resíduos urbanos em lixões, enquanto apenas 3% das cidades são atendidas por aterro sanitário, ao final, somente 8% efetuam a destinação de seus resíduos em aterros controlados. A Figura 2 detalha as unidades operantes em cada município do estado do Maranhão.

Figura 2 – Detalhamento das unidades operantes em cada município do estado do Maranhão

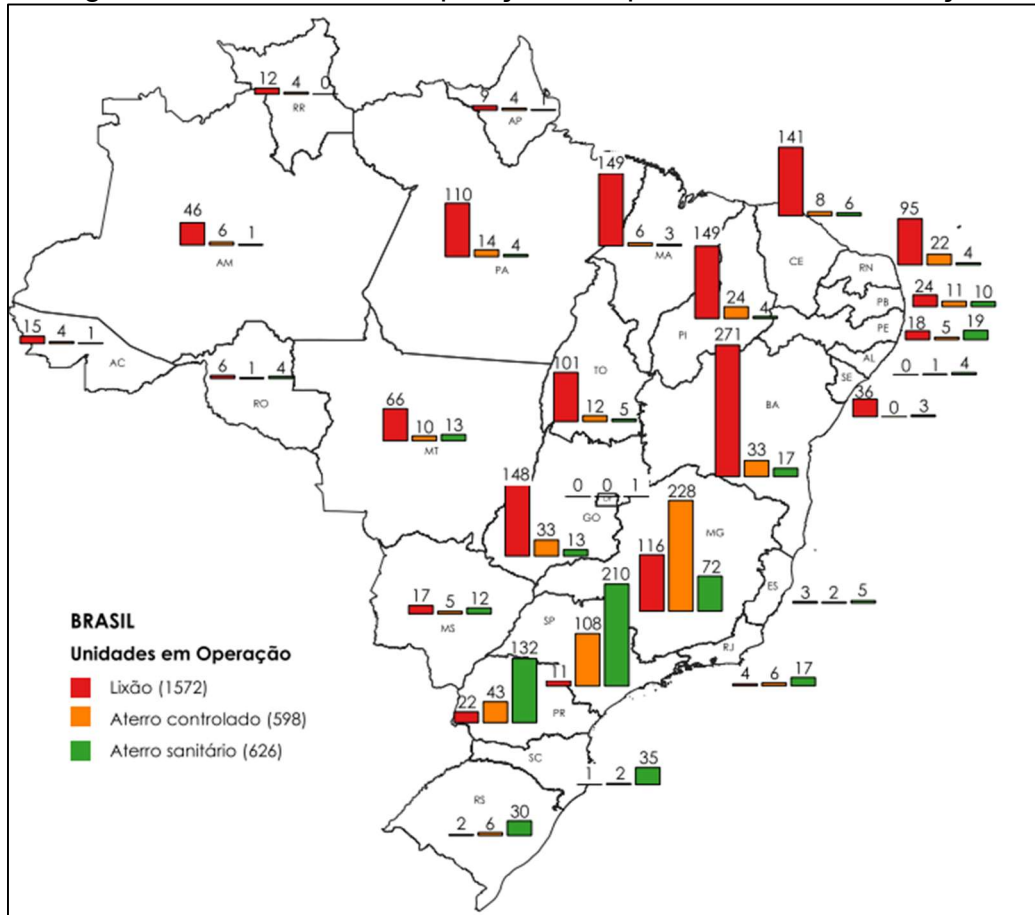


Fonte: Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes (ABETRE, 2020).

De acordo com o panorama realizado pelo SNIS (2023), o estado do Maranhão possui 149 unidades de Lixão, 6 unidades de Aterro Sanitário e 3 unidades de Aterro Controlado, algo que representa um agravante as condições mínimas de saneamento básico, onde a maior parte das unidades em funcionamento são locais

de disposição inadequada. A Figura 3 mostra o panorama do Brasil em relação as unidades de disposição final.

Figura 3 – Unidades de disposição final por unidade de federação



Fonte: SNIS (2023).

3.3.2 Destinação final em Imperatriz – MA

De acordo com o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS, 2018), a Secretaria Municipal de Infraestrutura e Serviços Públicos é responsável pela coleta em Imperatriz, no qual conta com contrato emergencial de prestação de serviço com uma empresa privada do ramo. A coleta abrange toda área urbana e rural do município, sendo realizado de segunda-feira a domingo em turnos diurnos e noturnos.

A destinação final dos resíduos sólidos em Imperatriz é realizada no lixão da cidade que situa-se na zona rural do município. O lixão de Imperatriz recebe resíduos provenientes de toda a cidade, não apenas os sólidos domésticos, mas também RCC (Resíduos de Construção Civil), volumosos e outros. Além disso, cabe ressaltar que

a rodovia que liga a cidade de Imperatriz à área do lixão é utilizada para despejo irregular de resíduos sólidos. Além dos problemas ambientais, que incluem a contaminação do solo e o risco de poluição do lençol freático, há também a questão da poluição do ar resultante da queima dos resíduos. (PMGIRS, 2018).

De acordo com SNIS (2023), o município não dispõe de instalações para a destinação adequada dos resíduos sólidos coletados pelo serviço público, para sanar a necessidade, Imperatriz conta com um lixão para atender o perímetro urbano e lixões pequenos para atender a zona rural, todos são a céu aberto, onde é disposto boa parte dos resíduos coletado na cidade, ao qual não apresenta qualquer controle por parte do município para a melhor gestão dos resíduos. Na Figura 4, é possível compreender a situação do lixão que atende ao município.

Figura 4 – Lixão sede Imperatriz – MA



Fonte: Notícia da Prefeitura de Imperatriz em website (2022a).

Estima-se que em Imperatriz possui uma geração de 1,271 kg/hab.dia de RSD (Resíduos Sólidos Domiciliar), o que gera 314,57 toneladas de RSD, sendo um total aproximado de 9.437,36 toneladas por mês (PMGIRS, 2018).

3.4 Projeto aterro sanitário em Imperatriz – MA

O projeto do Aterro Sanitário de Imperatriz – MA representa um marco significativo para a gestão de resíduos sólidos urbanos na região, visando substituir o antigo lixão e adequar o município às exigências da Política Nacional de Resíduos

Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305/2010. Este empreendimento é crucial para a saúde pública e a proteção ambiental local, abordando a destinação final dos resíduos de forma ambientalmente adequada e socialmente justa.

3.4.1 Detalhes do projeto e infraestrutura

O projeto do Aterro Sanitário de Imperatriz é abrangente e segue as melhores práticas da engenharia ambiental para este tipo de empreendimento. O edital de licitação destaca a complexidade e a robustez da infraestrutura a ser implementada. Espera-se que o aterro inclua sistemas modernos de impermeabilização, drenagem de lixiviados e gases, tratamento de efluentes, e monitoramento ambiental, elementos essenciais para minimizar os impactos negativos no meio ambiente e na saúde urbana (PREFEITURA DE IMPERATRIZ, [s.d.]).

De acordo com o edital divulgado, que contempla o memorial do projeto, a área sancionada não possui necessidade de rebaixamento de lençol freático, pois na sondagem não foi detectado a presença de água. Para a drenagem superficial do percolado foi adotado um sistema de espinha de peixe, fazendo uso da manta geotêxtil, a fim de encaminhar a água para as lagoas de tratamento. Ainda segundo o Edital, o aterro irá contar com um sistema de impermeabilização superior montado por uma camada de 50 cm de um material argiloso, aplicação de camada de adubo e em seguida a aplicação de hidrossemeadura (PREFEITURA DE IMPERATRIZ, [s.d.]).

O projeto também inclui a construção de infraestrutura de apoio, como guarita, balança, pátio de manobras, e possivelmente, estruturas para a triagem e valorização de resíduos recicláveis, embora o foco principal seja a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (PREFEITURA DE IMPERATRIZ, [s.d.]). A atenção a esses detalhes técnicos são fundamentais para que o aterro não seja apenas um local de descarte, mas uma parte integrante de um sistema de gestão de resíduos que minimize os danos ambientais e promova a sustentabilidade (FERREIRA; SARTOR, 2015).

De acordo com a localidade da construção do Aterro Sanitário, considera-se a análise pedológica divulgada pelo banco de dados do IBGE, onde é predominante a característica do Luvissole, conforme ilustra a Figura 5.

Figura 5 – Mapa pedológico com localização da construção do Aterro Sanitário



Fonte: Adaptado de IGBE (2011).

3.4.2 Andamento atual da implantação do aterro sanitário em Imperatriz – MA

As obras do novo aterro sanitário de Imperatriz têm demonstrado progresso constante. Conforme notícias da prefeitura, em março de 2025, a construção já havia atingido 60% de conclusão (PREFEITURA DE IMPERATRIZ, 2025). Essa etapa avançada sinaliza um compromisso em finalizar a infraestrutura necessária para a operação. O início efetivo da construção ocorreu em 28 de junho de 2022, após anos de planejamento e processos licitatórios (PREFEITURA DE IMPERATRIZ, 2022b). A agilidade no avanço das obras reflete a prioridade dada ao projeto, que busca resolver um problema histórico de descarte inadequado de lixo na cidade. A obra possui um prazo estimado para entrega no fim do ano de 2025.

Figura 6 - Andamento da obra de execução do Aterro Sanitário



Fonte: Notícia da Prefeitura de Imperatriz em website (2025).

A Figura 6 apresenta o andamento atual da obra de execução do Aterro Sanitário de Imperatriz – MA.

3.5 Métodos de tratamento de RSU

De acordo com o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB), o tratamento de resíduos sólidos envolve atividades voltadas para reduzir o volume ou o potencial de contaminação desses resíduos. Isso pode ser feito tanto evitando o descarte em locais inadequados quanto reaproveitando materiais inertes ou estáveis. As principais formas de tratamento incluem reciclagem, incineração, compostagem e disposição em aterros sanitários (BRASIL, 2019). Dentre as formas de tratamento, o modelo a ser discutido nesta pesquisa, será a disposição final em aterros sanitários.

3.5.1 Aterro Sanitário

Um aterro sanitário configura-se como método de disposição final de RSU e outros tipos de resíduos no solo, projetado para proteger a saúde pública e minimizar os impactos ambientais. Esse sistema utiliza técnicas de engenharia para compactar e confinar os resíduos na menor área possível, reduzindo seu volume. Além disso, os resíduos são cobertos com uma camada de terra diariamente ou com maior

frequência, se necessário, garantindo maior segurança e controle ambiental, conforme descrito na norma NBR 8419.

O aterro sanitário, embora seja considerado uma solução adequada para a disposição final de resíduos, também pode ser visto como uma forma de tratamento de RSU com maior viabilidade de implantação devido a fatores ambientais, sanitários, sociais, entre outros. Para aumentar sua eficiência e prolongar sua vida útil, sua operação pode ser complementada por práticas sustentáveis, como a reciclagem e o reaproveitamento de materiais (RECESA, 2008).

Esse método consiste na disposição de resíduos diretamente no solo, seguindo critérios técnicos de engenharia e normas específicas, garantindo estabilidade, controle ambiental e proteção à saúde pública (BRASIL, 2019).

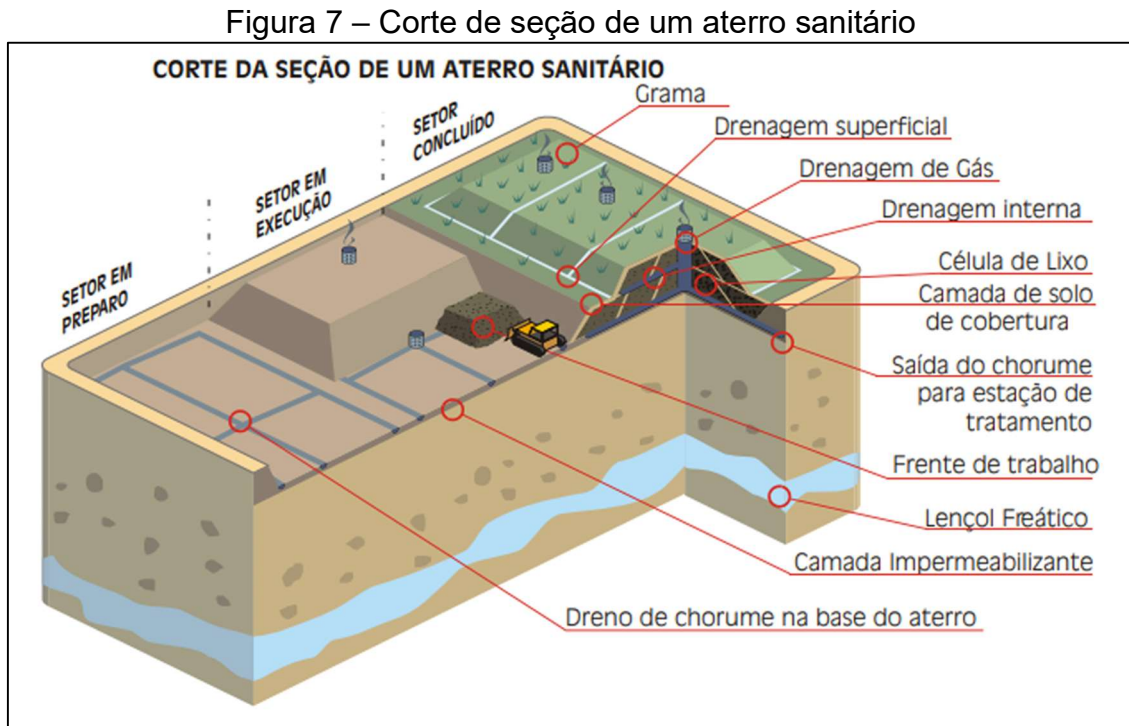
3.6 Processo executivo do aterro sanitário

A instalação de um aterro sanitário exige o cumprimento de critérios técnicos que viabilizem sua implantação. O processo começa com a seleção de um local apropriado, garantindo que a área escolhida não interfira no zoneamento urbano e ambiental. Além disso, o local deve estar estrategicamente posicionado, com fácil acesso, de forma a otimizar os custos de logística e facilitar a coleta de solo em jazidas de empréstimo. Por fim, é essencial avaliar o tipo de aquífero presente na região para assegurar que a implantação seja feita de maneira segura e sustentável (BORBA et al., 2020).

Segundo Monteiro (2017), para o funcionamento com eficiência o aterro deve contar com as seguintes unidades e processos para possibilitar sua operação:

- Unidades de separação de funcionamento individual onde é efetuada a triagem dos resíduos segundo a sua classificação (lixo domiciliar, hospitalar, industrial, dentre outros);
- Impermeabilização obrigatória da camada de base do aterro para impedir a percolação do fluido produzido pelo lixo orgânico;
- Sistemas de coleta e tratamento do chorume (líquido percolado por resíduos durante seu processo de deterioração);
- Sistemas de drenagem e desvio de fluxo de águas pluviais;

- Sistemas de coleta e aproveitamento do biogás, o beneficiamento dos gases emitidos dos resíduos geralmente é utilizado para produção de energia;
- Área para estoque de materiais;



Fonte: Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia (CONDER, 2011).

Na Figura 7, é possível entender um esquema de um aterro sanitário.

3.7 Barreira impermeabilizante da camada de base

Os sistemas de proteção dos aterros sanitários são compostos por estruturas projetadas para garantir o descarte adequado dos resíduos sólidos urbanos em áreas específicas, assegurando a segurança ambiental, a saúde pública e a conformidade técnica (LOCASTRO; ANGELIS, 2016).

De acordo com a NBR 13896 (1997), a impermeabilização da base do aterro tem como principal função evitar que líquidos percolados sejam liberados para o ambiente. Sem essa barreira, esses líquidos podem contaminar o solo, os lençóis freáticos e os corpos d'água próximos à área de disposição de resíduos (NASCIMENTO et al., 2021).

O processo de impermeabilização pode ser simples, utilizando apenas um tipo de material, ou mais complexo, combinando camadas alternadas de solo natural e

geomembrana, entre outros métodos. A escolha da técnica ideal depende da composição química do lixiviado, do gradiente hidráulico do local e dos custos associados à obtenção de materiais naturais. As barreiras mais utilizadas incluem argilas naturais, solos argilosos compactados e materiais sintéticos, como apontado na literatura (PIEIDADE JUNIOR, 2003). Nesta pesquisa, será discutido as barreiras com uso de argilas naturais.

3.7.1 Barreira de argilas naturais

As barreiras de argilas naturais são formadas por solos que contêm altas concentrações de argila, o que naturalmente lhes confere baixos índices de permeabilidade. Por essa característica, esses solos são considerados adequados para receber resíduos diretamente dispostos sobre eles (LEME, 2013).

Segundo Piedade Junior (2003), solos que apresentem seu coeficiente (K) de permeabilidade na ordem de 10^{-9} cm/s, são recomendáveis para uso como base impermeabilizante. Junto a isto, evidencia-se que, juntamente aos baixos índices de permeabilidade, é crucial que esses solos estejam em excelentes condições, totalmente livres de defeitos estruturais como falhas, trincas, fraturas, juntas, fissuras ou perfurações.

Devido à dificuldade da determinação precisa in loco da permeabilidade de maneira uniforme dos materiais de revestimento natural, é recomendado a execução de barreiras de revestimento ao contrário do uso apenas da barreira natural presente no local do seu uso, dependendo do lugar de implantação não é normalmente indicada (EPA, 2019).

De acordo com Sampaio (2011), a utilização de solos para criar camadas impermeabilizantes na base de aterros sanitários é frequentemente realizada com argilominerais. Esses minerais secundários, obtidos da fração argilosa do solo, possuem partículas com carga superficial negativa, o que lhes permite reter cátions e formar ligações estáveis com a matéria orgânica presente no solo, devido ao aumento de superfície do argilomineral. Por serem extremamente finos, os argilominerais têm uma forte atração por água e elementos químicos dissolvidos, sendo capazes de absorver grandes quantidades de água. Essa propriedade os torna expansivos ao entrar em contato com fluidos. Os principais tipos de argilominerais incluem a caulinita,

a esmectita, a illita e as montmorilonitas, todos compartilhando características como a capacidade de adsorção de água e íons.

Segundo Leme (2013), em regiões onde o solo local não possui as condições ideais para a construção de barreiras com solos compactados, como argilas, argilas siltosas ou siltes argilosos, é possível melhorar as propriedades do solo adicionando argilas comerciais, como a bentonita, com o objetivo de reduzir os índices de permeabilidade.

3.7.2 Barreira de solos argilosos compactados

As barreiras de solos argilosos compactados representam uma solução técnica e economicamente vantajosa para a impermeabilização, especialmente em projetos de grande escala, como aterros sanitários, lagoas de tratamento de efluentes e canais. A eficácia impermeabilizante é obtida através de um processo de compactação controlada, que visa rearranjar as partículas do solo para atingir uma alta densidade e um baixo índice de vazios, resultando em uma condutividade hidráulica significativamente reduzida, tipicamente na faixa de 10^{-7} a 10^{-9} cm/s (ASTM D5084, 2024).

Solos naturais que possuem o coeficiente de permeabilidade reduzido, com solos argilosos, argilas siltosas, e siltes argilosos, após receberem energia de compactação, apresentam potencial para utilização por serem ótimas barreiras impermeabilizante (EPA, 2019).

A construção de uma barreira de solo argiloso compactado envolve etapas críticas, começando pela seleção criteriosa do material. Solos com teor de finos (partículas menores que 0,075 mm) entre 30% e 50% e um índice de plasticidade adequado (geralmente acima de 15%) são ideais para garantir a trabalhabilidade e a capacidade de atingir a baixa permeabilidade. Após a seleção, o solo é espalhado em camadas horizontais de espessura controlada (tipicamente 15 a 30 cm de espessura compactada) e compactado com equipamentos pesados, como rolos compactadores pé de carneiro ou vibratórios. O controle do teor de umidade durante a compactação é fundamental; a compactação ligeiramente acima do teor de umidade ótimo (lado úmido da curva Proctor) tende a produzir uma estrutura mais dispersa e menos permeável, com poros menores (SEED; CHAN, 1959).

Apesar dos desafios, a barreira de solo argiloso compactado continua sendo uma solução de engenharia amplamente adotada devido à sua relação custo-benefício favorável e à utilização de materiais locais. A sua capacidade de se adaptar a pequenas deformações do terreno e de ser reparada com relativa facilidade são vantagens notáveis. O sucesso de sua aplicação depende, contudo, de um rigoroso programa de controle de qualidade que abrange desde a caracterização do solo na jazida até a verificação da densidade e permeabilidade no campo, garantindo que os parâmetros de projeto sejam atingidos e mantidos ao longo da vida útil da estrutura (DANIEL; BENSON, 1990; SHACKELFORD et al., 2000).

3.7.3 Barreira com uso de materiais sintéticos

As barreiras compostas por materiais sintéticos têm como finalidade impedir a contaminação de aterros sanitários por lixiviados. Conforme a literatura, os materiais mais empregados em obras de engenharia para essa finalidade são as geomembranas e os GCL (Geosynthetic Clay Liner) (Locastro; Angelis, 2016).

A principal característica que confere às geomembranas sua eficácia como barreira é sua baixíssima permeabilidade hidráulica, tipicamente na ordem de 10^{-12} a 10^{-13} cm/s, que é significativamente menor do que a de solos argilosos compactados. Isso se deve à sua natureza polimérica e à ausência de vazios interconectados que permitiriam o fluxo de fluidos. Os materiais mais comuns são o Polietileno de Alta Densidade (PEAD ou HDPE) e o Polietileno de Baixa Densidade Linear (PEBDL ou LLDPE), cada um com propriedades específicas de resistência e flexibilidade que os tornam adequados para diferentes condições de projeto em aterros (KOERNER, 2012)

A principal função do aterro sanitário é evitar que contaminantes passem para o meio ambiente. Quando faltam solos adequados, os geossintéticos surgem como uma solução impermeabilizante mais acessível e disponível em quantidade maior, comparado aos solos argilosos próximos à obra (BOSCOV, 2008).

3.8 Argilominerais

Os argilominerais são abundantes na crosta terrestre, resultado direto do intemperismo das rochas. Esse processo, envolve tanto a desintegração mecânica

quanto a decomposição química, neste processo origina-se as argilas (partículas finas) (CAPUTO, 2000).

Por serem extremamente finos, os argilominerais têm uma forte atração por água e elementos químicos dissolvidos, sendo capazes de absorver grandes quantidades de água. Essas propriedades os torna expansivos ao entrar em contato com fluidos. Os principais tipos de argilominerais incluem a caulinita, a esmectita, a illita e as montmorilonitas, todos compartilham a características de adsorver água e íons (BORBA et al., 2020).

Conforme Borba et al. (2020), devido à extensa quantidade de argilominerais existentes com o passar do tempo, a partir de desenvolvimento de pesquisa sobre a utilização de argilominerais no solo, diversos autores classificaram estes materiais acordo com suas pontes de ligação entre as moléculas, interação catiônica, além de seus índices de consistência como demonstra o Quadro 3 a seguir, representando os principais grupos de argilominerais, classificado de acordo com suas propriedades físicas.

Quadro 3 – Descrição dos tipos de argilominerais

Grupo de Argilomineral	Propriedades
Caulinita	A caulinita é um mineral que se caracteriza por sua baixa eletronegatividade, o que reduz sua capacidade de troca de cátions, o que a torna uma argila com limitada capacidade de retenção de fluidos e baixa expansibilidade. Quando exposta a umidade, a caulinita pode se tornar plástica, especialmente em situações de baixa umidade (SAMPAIO, 2011).
Esmectita	As esmectita apresentam uma estrutura que consiste em ligações de sílica unidas por pontes de oxigênio e possuem alta eletronegatividade, o que ocasiona em uma forte ação repulsiva em relação aos cátions. Assim, a esmectita é capaz de manter um baixo teor de umidade, tornando-se expansiva quando em contato com água (TONNESEN et al., 2012).
Illita	As illitas são argilas que possuem uma estrutura molecular que lembra a das montmorilonitas, mas apresentam uma interação catiônica e eletronegatividade mais moderadas.

	Como resultado, elas têm uma capacidade de adsorção de líquidos intermediária, e são, em geral, pouco expansivas (FRANCESCHET, 2006).
Montmorilonita	As montmorilonitas consistem em uma unidade de alumínio para cada duas unidades de silício. Essa argila possui um elevado limite de plasticidade e, por isso, retém uma quantidade significativa de umidade. Sua capacidade de troca catiônica resulta em ligações entre os elementos que não são suficientemente robustas para formar uma barreira que impeça a passagem da água. Por esse motivo, essas argilas podem ser classificadas como altamente expansivas e com baixa capacidade de absorção (FRANCESCHET, 2006).

Fonte: Autoria própria (2025).

A alta área de superfície específica dos argilominerais é um ponto crucial. Devido ao seu tamanho nanométrico e formato lamelar, as partículas de argila oferecem uma vasta superfície para a adsorção de moléculas de água (MOTTA, 2017). Essa água adsorvida, conhecida como água estrutural ou água de adsorção, forma uma película em torno das partículas, aumentando a tortuosidade dos poros e, em grande medida, reduzindo a permeabilidade efetiva do solo.

Caputo (2000) conclui que quanto mais fino o solo, maior a sua superfície específica, constituindo uma das razões da diferença entre as propriedades físicas dos solos argilosos. Para os argilominerais, as Superfícies Específicas - SE assumem valores de:

- Caulinita = 10 m²/g;
- Illita 80 m²/g
- Montmorilonita 800 m²/g

A expansibilidade e contração volumétrica, particularmente das esmectitas, são diretamente proporcionais às mudanças na permeabilidade. Quando essas argilas absorvem água, se expandem, diminuindo o volume dos vazios e, conseqüentemente, diminuindo a condutividade hidráulica do solo. Por outro lado, a contração durante a secagem pode gerar fissuras e trincas, que podem aumentar momentaneamente a permeabilidade em um macro-nível (CAPUTO, 2000).

3.8.1 Argila Bentonita

A bentonita é uma argila constituída principalmente por um ou mais argilominerais do grupo das esmectitas, com destaque para a montmorilonita (FERREIRA, 2009). Graças à sua abundância de partículas muito finas, ela apresenta baixo teor de absorção superficial e elevada capacidade de interação catiônica, características que conferem alta expansibilidade à argila. Suas propriedades reológicas, como viscosidade e a tixotropia, tornam a bentonita amplamente utilizada em aplicações industriais, incluindo sua adição ao solo para criar barreiras impermeabilizantes e alcançar as características necessárias (TONNESEN et al., 2012).

A adição de bentonita ao solo existente visa aprimorá-lo, transformando-o em uma camada impermeabilizante fundamentada para aterros sanitários. Isso está relacionado ao coeficiente de condutividade hidráulica que essa camada terá após o tratamento. No entanto, é essencial avaliar a viabilidade da utilização dessa técnica de impermeabilização. Segundo os dados divulgados pela Agência Nacional de Mineração (ANM, 2018), a produção mundial de bentonita em 2017 cresceu 8,4% em relação a produção de 2016, cenário este que pode representar um aumento comercial do produto. A Tabela 1 detalha a produção mundial de Bentonita.

Tabela 1- Reserva e produção mundial de Bentonita em 2017

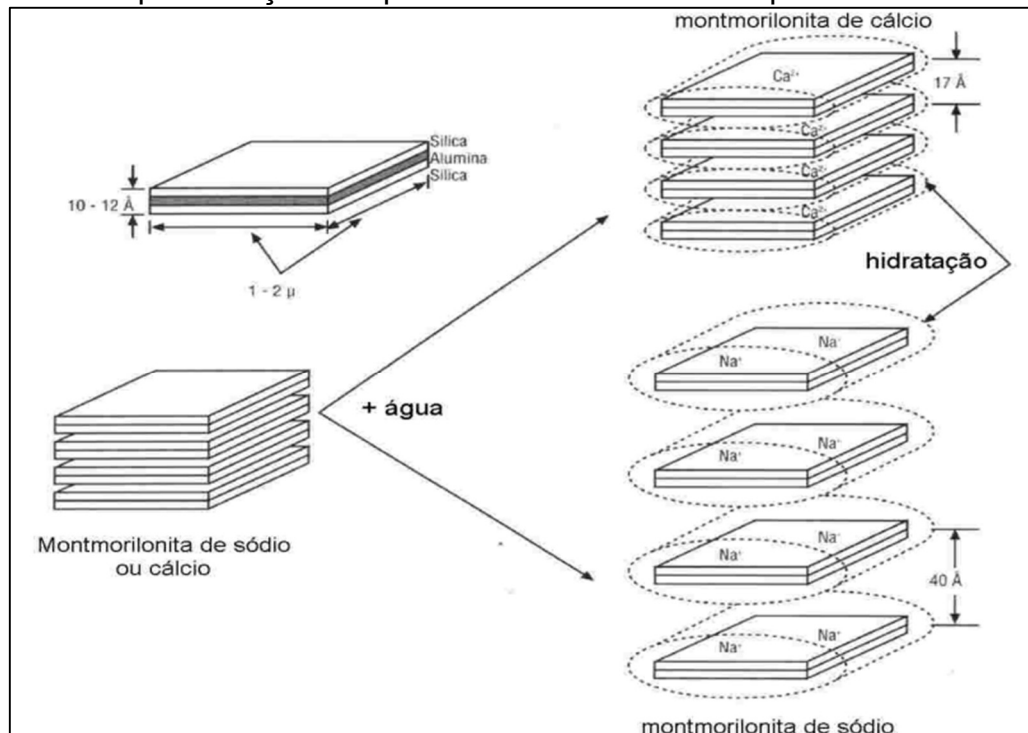
Países	Reservas		Produção (t)	
	2017	2016	2017	Percentual (%)
Brasil	54.094	448.004	616.929	3,0
China		5.600.000	5.600.000	27,2
Estados Unidos		3.600.000	4.300.000	20,9
Turquia		3.135.000	3.140.000	15,2
Grécia	<i>As reservas globais de bentonita são extensas.</i>	808.000	1.100.000	5,3
Índia		802.000	800.000	3,9
México		470.000	470.000	2,3
Irã		436.000	436.000	2,1
Outros países		3.700.996	4.137.071	20,1
Total		19.000.000	20.600.000	100

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Mineração (2018).

As argilas bentonitas se classificam segundo seus cátions trocáveis como sódio ou cálcio, sendo chamadas de bentonitas sódicas ou cálcicas. As bentonitas que não se expandem quando hidratadas são aquelas que não tem sódio como cátion interlamelar preponderante, são geralmente as cálcicas. Já as bentonitas que expandem são as que possuem sódio, que quando sua superfície entra em contato com a água possuem a capacidade de adsorver várias moléculas de água, aumentando seu volume em até 3x (FERREIRA, 2009).

As argilas bentonítica constituem-se por pacotes laminares, onde cada lâmina possui a espessura de 10 Å (Angstrom), correspondendo a 1 milhão de lâminas a cada milímetro. Ao entrarem em contato com a água os pacotes laminares de argila bentonita vão se separando, gerando o efeito de dispesão, aumentando sua superfície exposta (FERREIRA, 2009). A Figura 8 mostra o processo de hidratação de uma bentonita esmectita.

Figura 8 – Representação das partículas de bentonita em processo de hidratação

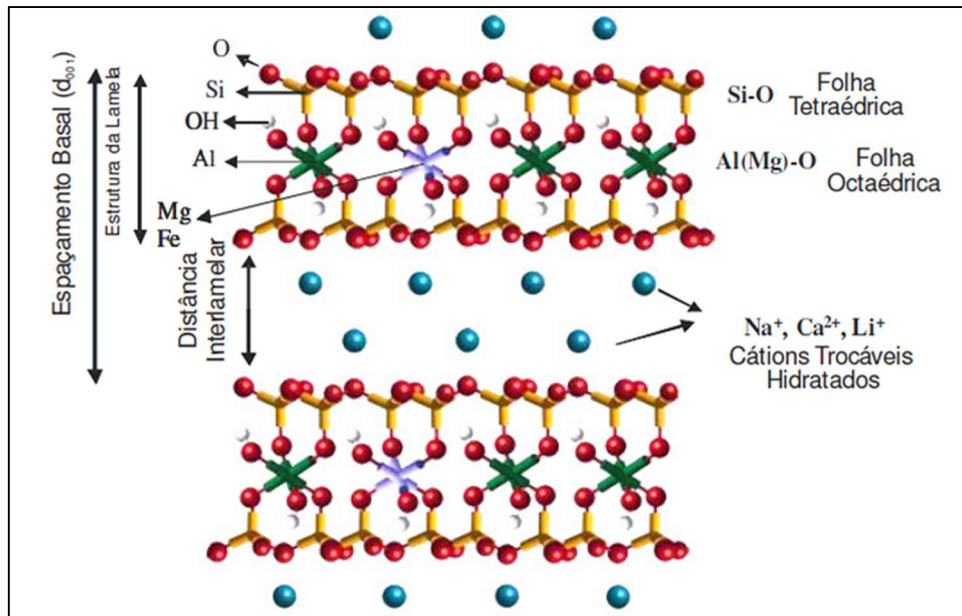


Fonte: Adaptado de Ferreira (2009)

A composição organizacional da bentonita é formada por duas folhas de silicato tetraédricas, e juntamente a estes uma folha central octaédrica e unidos entre si por oxigênios comuns às folhas. Essa junção forma uma placa, onde são espaçados e esses espaçamento é chamado de distância interlamelar, no qual é composto por

cátions trocáveis, como Na, Ca²⁺ e Li, como pode ser visto na Figura 9 (Garnica et al., 2018).

Figura 9 – Estrutura da argila bentonita in natura



Fonte: Adaptado de Garnica et al. (2018).

Argilas bentoníticas têm sido utilizadas há muitos anos como agente dispersante na composição de fluidos para perfuração de poços. Esse processo exige que todas as propriedades físico-químicas e reológicas sejam cuidadosamente controladas para obter o melhor desempenho. No entanto, isso foi prejudicado ao longo dos anos devido à exploração desordenada, afetando as características desejadas da bentonita (FERREIRA, 2009). Portanto, há necessidade de investigação da argila bentonítica em questão para obter resultados mais precisos.

3.9 Classificações geotécnicas

As classificações mais tradicionais são essencialmente baseadas nos índices, compostos pelos limites de Atterberg e na composição granulométrica dos solos. No Brasil, de acordo com Santos (2006), as mais difundidas são o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), que é descrito pela norma americana D2488-17 (ASTM, 2017) e a classificação AASHTO - TBR (Transportation Reserarch Board), que é descrito pela norma americana D3282-24 (ASTM, 2024).

3.9.1 Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)

O Sistema Unificado de Classificação dos Solos, foi originalmente desenvolvido por Arthur Casagrande e adotado pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, que lhe deu o nome e divulgado.

No SUCS, os solos são classificados com base na determinação granulométrica do solo e nos limites de Atterberg (limite de liquidez, limite de plasticidade de índice de plasticidade). Para a classificação, os solos são reunidos em quinze grupos diferentes, sendo representados por duas letras, onde a primeira apresenta o grau de granulometria e a segunda a plasticidade, de acordo com o Quadro 4.

Quadro 4 - Classificação de solos segundo SUCS

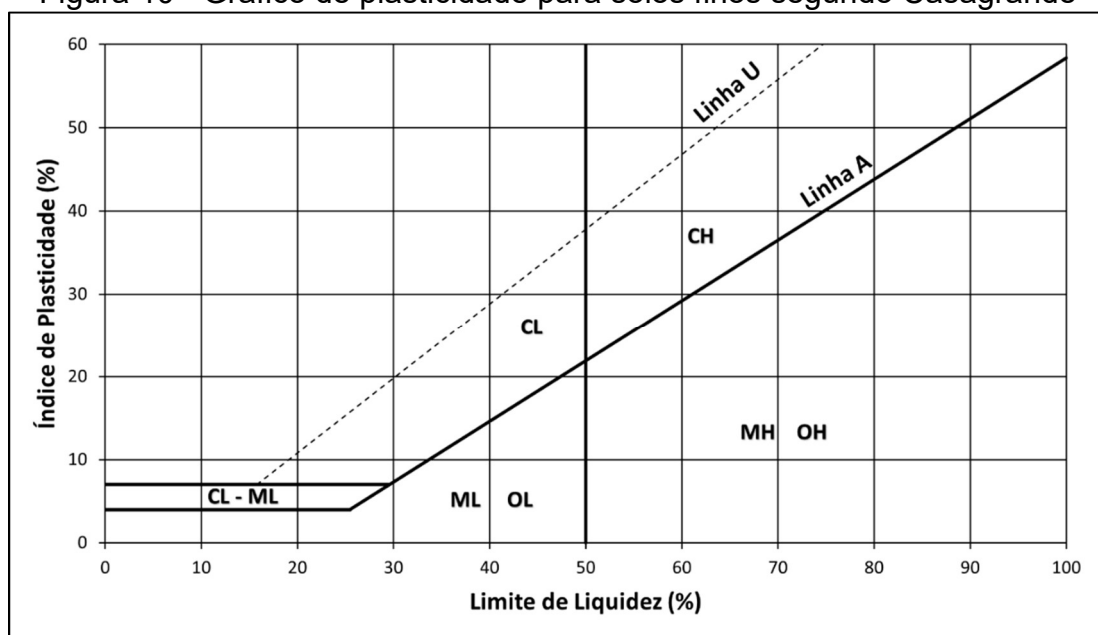
Processo para identificação		Grupo	Nome do Grupo	Designação Característica
Solos de granulação grossa (mais da metade passante na #40)	Pedregulhos puros (pouco ou nenhum fino)	GW	Pedregulho bem graduado	Misturas de areia e pedregulho com pouco ou nenhum fino
		GP	Pedregulho mal graduado	Misturas de pedregulho e areia com pouco ou nenhum fino
	Pedregulhos com finos (apresenta quantidade de finos)	GF	Pedregulho siltoso	Misturas de pedregulho, areia e silte mal graduados.
		GC	Pedregulho argiloso	Misturas de pedregulho, areia e argila bem graduados.
	Areias puras (pouco ou nenhum finos)	SW	Areia bem graduada	Areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		SP	Areia mal graduada	Areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
	Areias com finos (apresenta quantidade de finos)	SF	Areia siltosa	Misturas mal graduadas de areia e silte.
		SC	Areia argilosa	Misturas bem graduadas de areia e argila
Solos de granulação fina (mais da metade)	Siltes e Argilas (LL<50%)	ML	Silte pouco plástico	Siltes inorgânicos e areias muito finas, alteração de rocha, areias finas, siltosas ou argilosas com pequena plasticidade

passande na #200)		CL	Argila pouca plastica	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade, argilas pedregulhosas, argilas arenosas, argilas siltosas, argilas magras	
		OL	Silte orgânico	Siltes orgânicos e siltes argilosos orgânicos de baixa plasticidade	
		Siltes e argilas (LL>50%)	MH	Silte elástico	Siltes inorgânicos, micáceos ou diatomáceos, finos arenosos ou solos siltosos, siltes elásticos
			CH	Argila muito plástica	Argilas inorgânicas de alta plasticidade, argilas gordas
			OH	Argila orgânica	Argilas orgânicas de média e alta plasticidade
Turfas	Identificado pelo cor, cheiro, porosidade e textura fibrosa	Pt	Turfa	Solos com elevado teor de matéria orgânica	

Fonte: Santos (2006).

Para os solos de granulação final, ou seja, solo menor que 0,42 mm, a norma americana (DNIT, 2006), determina uma carta gráfica que relaciona o valor do IP e LL (%), subdividindo esse gráfico em regiões que determinam suas classificação, conforme a Figura 10.

Figura 10 - Gráfico de plasticidade para solos finos segundo Casagrande



Fonte: DNIT (2006).

3.9.2 Classificação TBR (Transportation Research Board)

De acordo com Santos (2006), divergente à classificação SUCS, a TRB inclui o Índice de Grupo, que auxilia na partições e identificações do grupo da amostra. Este parametro é um número inteiro com intervalo entre 0 a 20, no qual é gerado pela função da porcentagem passante na peneira n° 200 e das propriedades de índices, ou seja, o LL e IP, sendo dado pela Equação 1:

$$IG = 0,2 a + 0,005 a . c + 0,01 b . d \quad (1)$$

onde:

$a = P200 - 35$ (se $P200 > 75 \therefore a = 40$ e se $P200 < 35 \therefore a = 0$), sendo que $0 \leq a \leq 40$;

$b = P200 - 15$ (se $P200 > 55 \therefore b = 55$ e se $P200 < 15 \therefore b = 0$), sendo que $0 \leq b \leq 40$;

$c = LL - 40$ (se $LL > 60 \therefore c = 20$ e se $LL < 405 \therefore c = 0$), sendo que $0 \leq c \leq 20$;

$d = IP - 10$ (se $IP > 30 \therefore d = 20$ e se $IP < 10 \therefore d = 0$), sendo que $0 \leq d \leq 20$;

LL = Limite de liquidez (%);

IP = Índice de plasticidade (%);

P200 = porcentagem passante na peneira n°200.

Nesta classificação, de acordo com Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), os solos são reunidos em grupos e subgrupos, divididos conforme a sua granulometria, limites de consistências (Limite de Attenberg) e do índice de grupo, apresentado na Quadro 5.

Quadro 5 – Classificação dos solos de acordo com TRB

Classificação Geral	Materiais granulares (p) (35% ou menos passando na peneira n° 200)						Materiais siltosos e argilosos (p) (mais de 35% passando na peneira n° 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6
Classificação em grupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7			
Granulometria - % passando na peneira										

N° 10	50 máx										
N° 40	30 máx	30 máx	51 mín								
N° 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Característica da fração passando na peneira N° 40:											
Limite de liquidez				40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de Plasticidade	6 máx	6 máx	NP	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín *
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx	4 máx	8 máx	12 máx	16 máx	20 máx
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

* O IP do grupo A – 7 – 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: DNIT (2006).

Ainda segundo a classificação TRB (DNIT, 2006), cada grupo possui uma característica:

- **Grupo A-1:** possui uma subdivisão titulado com A – 1 – a e A – 1 – b
 - Subgrupo A-1-a: Constituído principalmente por fragmentos de pedra ou pedregulho, com ou sem material fino bem graduado, funcionando como aglutinante;
 - Subgrupo A-1-b: Constituído principalmente por areia grossa, com ou sem aglutinante de sol bem graduado;
- **Grupo A-2:** subdivido em quatro grupos:
 - Subgrupo A-2-4 e A-2-5: Abrangem materiais tais como pedregulho e areia grossa, em que o teor de silte e o IP ultrapassam os limites estabelecidos do Grupo A-1, e areia fina com silte não plástico excedendo os limites do Grupo A-3;
 - Subgrupo A-2-6 e A-2-7: As características desse grupo refletem no IG, que deixam de ser 0 para ter um limite de no máximo 4, caracterizando uma presença de argila plástica;
- **Grupo A-3:** O material típico deste grupo é areia fina de praia ou de deserto, sem silte ou argila, ou possuindo pequena quantidade de silte não plástico;
- **Grupo A-4:** Solo tipo siltoso não plástico, possuindo, geralmente, 5% ou mais passante na peneira n° 200. Além disso, possui uma granulometria composto por até 64% de areia e pedregulho;

- **Grupo A-5:** Semelhante ao grupo A-4, diferenciando por ser altamente elástico, devido ao seu nível de limite de liquidez;
- **Grupo A-6:** Este grupo é típico de solo argiloso e plástico, geralmente 75% passante na peneira nº 200. Possui um comportamento de ter elevada mudança de volume entre os estados seco e úmido, o que pode gerar contrações;
- **Grupo A-7:** Subdividido em dois grupos:
 - Subgrupo A-7-5: possui um IP moderado em relação ao LL, podendo ser altamente elástico e sujeito a elevadas mudanças de volume;
 - Subgrupo A-7-6: elevado IP em relação ao LL, estando sujeito a elevadas mudanças de volume.

3.9.3 Difração de Raio X

A técnica é amplamente reconhecida como a principal ferramenta para a identificação de minerais em dimensões reduzidas, sendo essencial em estudos de mineralogia dos solos. Além de permitir a identificação dos constituintes cristalinos das frações de argila e silte, a Difração de Raios X (DRX) também possibilita a análise do grau de cristalinidade e do tamanho dos cristais. Essa metodologia pode ainda ser utilizada para estimar o grau de substituição isomórfica e para quantificar os minerais presentes na amostra (Embrapa, 2017).

A difração de raios X ocorre devido ao espalhamento da radiação por um conjunto regular de centros de difusão, cujo intervalo entre os centros é aproximadamente igual ao comprimento de onda da radiação que a atinge. O espalhamento dos raios de radiação ocorre quando um fóton de radiação eletromagnética interage com um elétron que orbita um átomo, normalmente um cristal, conforme Shackelford (2008).

Ao incidir um feixe de raios X em uma substância cristalina, sua trajetória sofre desvio em todas as direções pelos átomos que compõe o cristal. Em algumas direções os raios X sofrem interferência destrutiva e em outras sofrem interferência construtiva produzindo máximos de intensidade. Esse processo representa a forma como os raios X sofrem difração (HALLIDAY et al., 2009).

Segundo Callister e Rethwisch (2016), para ocorrer interferência construtiva durante o espalhamento dos raios X é necessário que a diferença entre as trajetórias percorridas pelos feixes de radiação com ângulo de incidência igual seja um número

inteiro de comprimentos de onda. Neste sentido, tem-se o enunciado teórico para a Lei de Bragg mostrada na Equação 2:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta \quad (2)$$

onde:

n = valor da ordem de difração ou reflexão;

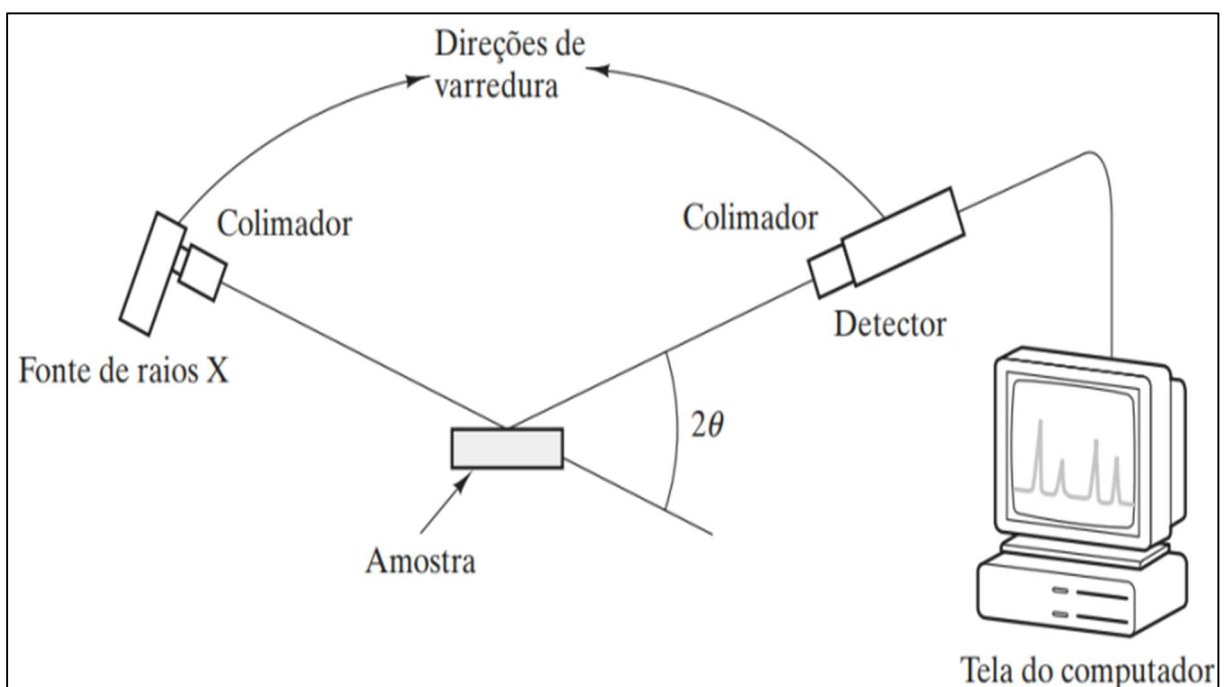
λ = O comprimento de onda da radiação incidente (nm);

d = A distância interplanar cristalina hkl da estrutura cristalina do mineral (nm);

θ = ângulo de incidência dos raios X.

O equipamento usado para determinar os ângulos nos quais ocorre a difração dos raios X em amostras pulverizadas é chamado de difratômetro. Um esquema simplificado é mostrado na Figura 11. O aparelho é composto por uma fonte de raios X, por uma amostra disposta em formato de chapa, um coletor e colimadores (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Esse sistema é conectado a um computador para gerar os gráficos com os padrões de difração, de modo a permitir a identificação das substâncias por meio da comparação com padrões já catalogados

Figura 11 – Esquema de operação de uma difração de Raios X



Fonte: Shackelford (2008).

De acordo com Albers et al. (2002), a difratometria de raios X é a técnica mais indicada para a determinação dos cristais em materiais cerâmicos. E dentre as vantagens da técnica, destaca-se a simplicidade e confiabilidade dos resultados em relação à determinação de fases em cristais. Com relação a caracterização de argilominerais, à difratometria de raios X é ainda mais indicada, pois uma análise puramente química destacaria os elementos químicos, mas não a forma como eles se conectam, o que tornaria a identificação dos minerais muito complexa (ALBERS et al., 2002).

3.9.4 Adsorção de Azul de Metileno

O uso do azul de metileno para classificação de solos foi desenvolvido a partir de inúmeras divergências entre os resultados determinados através dos métodos de classificações recorrentes/tradicionais e o desempenho nas obras geotécnicas. Estudos como o de Fabbri (1994), comprovam que o ensaio de adsorção de azul de metileno surge como uma alternativa inovadora, eficiente, econômica e rápida para a caracterizar o solo, especificamente o grau de argilosidade, caracterizando a amostra por sua origem, a fração fina que o compõe e sua Atividade Coloidal.

Conforme Pejon (1992), a análise da atividade das argilas dos solos pode ser realizada com uma determinada solução denominada azul de metileno também conhecida no campo da química como cloridrato de metiltionina, possui estrutura química de $C_{16}H_{18}SN_3CL+3H_2O$. Tem por funcionalidade um corante de reação catiônica, quando diluído em água, dissocia-se em cargas eletronegativas (ânions) de cloreto e cargas positivas de (cátions) de azul de metileno.

Fabbri (1994) titulou o coeficiente de atividade (CA) como um coeficiente que mede a atividade mineralógica dos solos. Esse coeficiente é calculado a partir da Equação 3:

$$CA = 100 * \frac{Va}{Pf} \quad (3)$$

Onde:

Va = Valor de azul (quantidade de azul de metileno consumida em mg por 1 g de amostra de solo);

Pf = porcentagem em massa que o solo contém da fração cujo o grau de atividade quer se avaliar, usualmente definido como a fração de argila com partículas inferior a 0,005 nm;

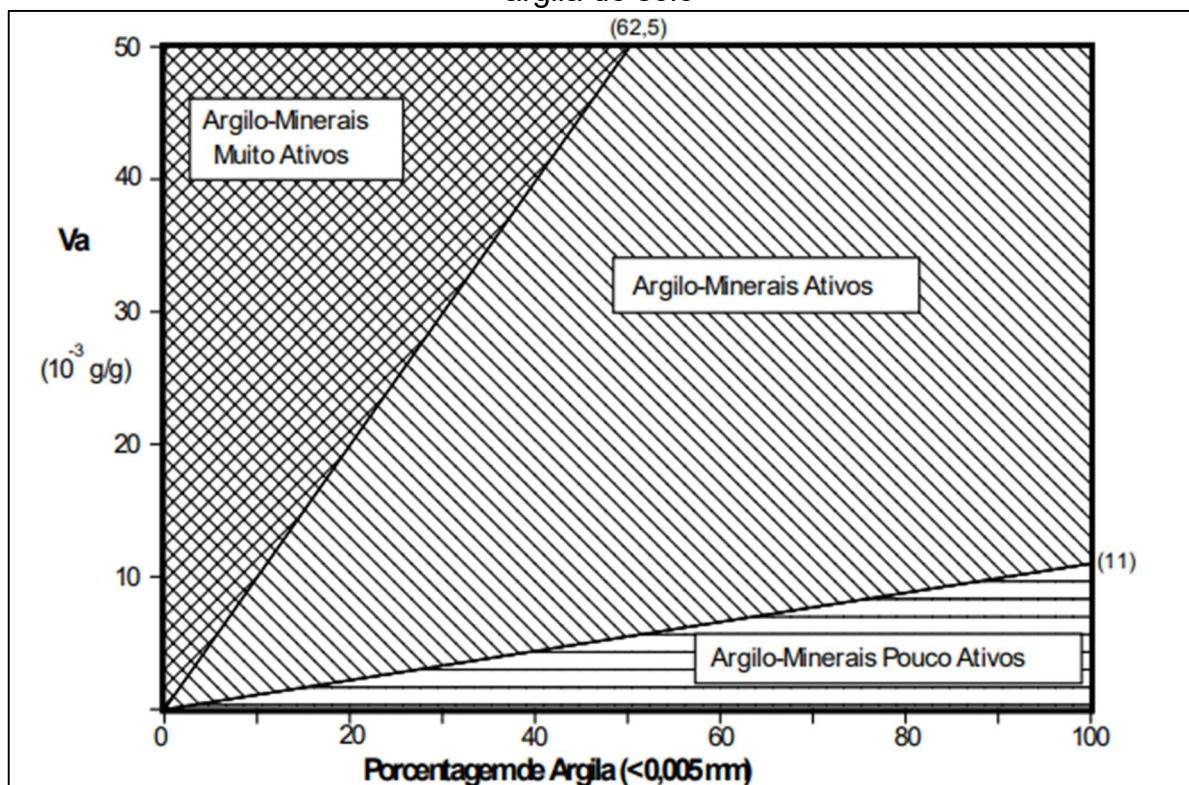
Diante disso, Fabbri (1994) propôs um ábaco (Figura 12), que sua funcionalidade consiste em avaliar a fração fina dos solos, dando limites de resultados do CA, classificando-o em três graus de atividade, conforme o Quadro 6:

Quadro 6 – Classificação dos resultados de CA

Coeficiente de atividade (CA)	Descrição
CA < 11	São caracterizados como pouco ativos: abrangem desde materiais inertes até argilo-minerais laterizados.
11 < CA < 80	São caracterizados como ativos: abrangem argilominerais dos grupos caulinitas e/ou ilitas.
CA > 80	São caracterizados como muito ativos: abrangem argilominerais dos grupos das montmorilonitas, por exemplo.

Fonte: Adaptado de Fabbri (1994).

Figura 12 – Ábaco proposto por Fabbri, onde caracteriza a atividade da fração de argila do solo



Fonte: Fabbri (1994).

O ábaco de Fabbri (1994), representado na Figura 12, apresenta duas linhas. Estas linhas são divisórias que separam os três graus de atividade do argilomineral (CA), os poucos ativos, ativos e muitos ativos, conforme descrito no Quadro 6 anteriormente.

3.9.5 Classificação MCT pelo Método das Pastilhas de Nogami e Villibor (1994)

Nogami e Villibor (1981) propuseram um sistema de classificação de solo denominado MCT, Miniatura, Compactado e Tropical, que permite agrupar os solos em duas classes os resultados de seu comportamento, sendo solos lateríticos (L) e não lateríticos (N) (Fabbri, 1994).

Ainda nesta classificação, Nogami e Villibor (1981), subdividiram esse comportamento laterítico e não laterítico em sete grupos, conforme o Quadro 7.

Quadro 7 - Classificação MCT conforme Nogami e Villibor

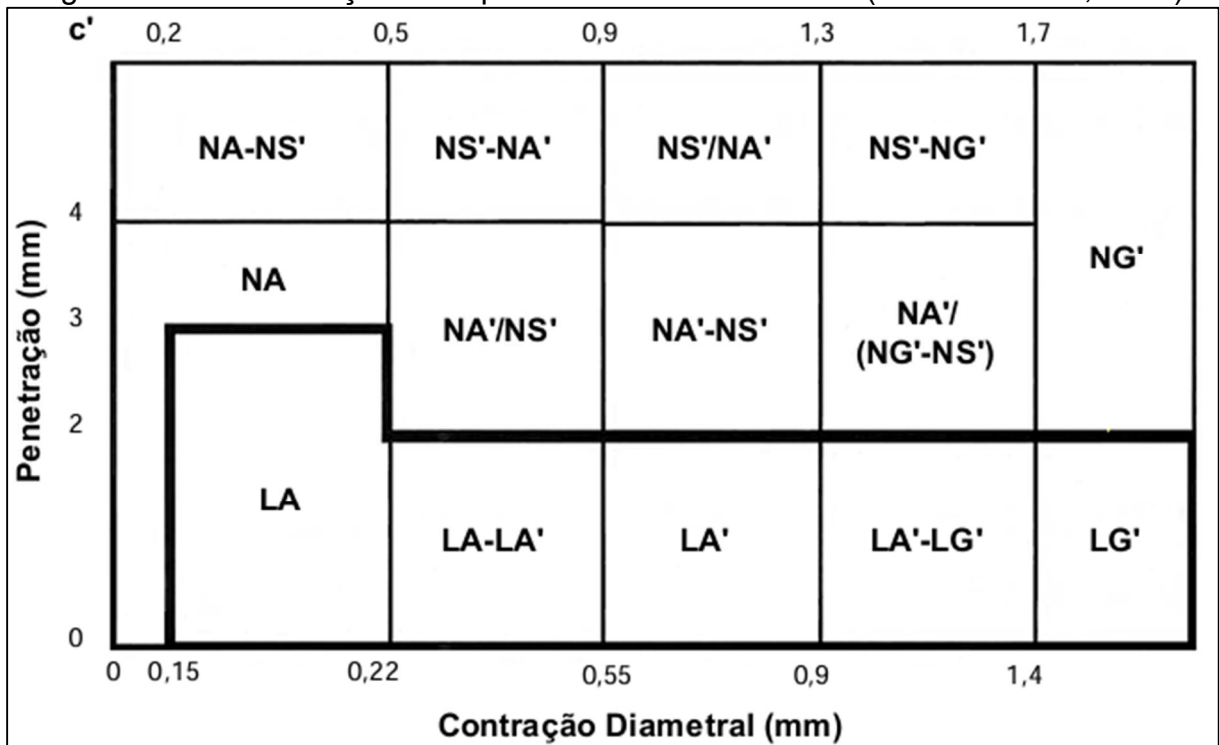
Grupo	Abreviatura	Características
Areias Lateríticas	LA	Areias com poucos finos, comportamento laterítico, típicas de solos quartzozos e regolíticos.
Solos arenosos lateríticos	LA'	Solos arenosos, textura média, com cortes firmes, cores vermelha e amarela, pouco erodíveis.
Solos argilosos lateríticos	LG'	Formados por argilas e argilas arenosas, estrutura em blocos, comportamento semelhante ao grupo LA' quando com alta argila.
Areias não lateríticas	NA	Solos arenosos, siltosos ou mistos, com grãos de quartzo e/ou mica, sem argilosos coesivos significativos.
Solos arenosos não lateríticos	NA'	Mistura de areias quartzosas, sem finos coesivos, originados de rochas ricas em quartzo (ex: granitos, gnaisses).
Solos siltosos não lateríticos	NS'	Solos saprolíticos siltoso-arenosos, derivados de rochas eruptivas/metamórficas, ricos em feldspato e quartzo.
Solos argilosos não lateríticos	NG'	Solos argilosos saprolíticos de rochas sedimentares, com micáceo-quartzosa, comportamento não laterítico.

Fonte: Santos (2006).

Com a finalidade de simplificar a realização do MCT, Nogami e Villibor (1994) propuseram o Método Expedito das Pastilhas, utilizando menor quantidade de amostra e equipamentos mais simples. O ensaio consiste na moldagem de corpo de prova em forma de pastilhas em anéis com 20 mm de diâmetro e posteriormente a medição da contração (Ct) e penetração das pastilhas (Santos, 2006).

Para a classificação do solo é determinada a partir do gráfico de classificação do método das pastilhas, conforme a Figura 13, onde é separado por regiões que possuem tais classificações conforme MCT.

Figura 13 – Classificação MCT pelo Método das Pastilhas (NOGAMI et al., 1996)



Fonte: Santos (2006).

Dessa forma, é possível determinar a classe do solo a partir dos valores contração diametral e penetração.

3.10 Permeabilidade dos solos

A permeabilidade é uma característica que apresenta grande variação em materiais inconsolidados, como solos e sedimentos. Esse parâmetro pode abranger uma vasta gama de valores, indicando a facilidade ou dificuldade com que a água (ou outros fluidos) pode atravessá-los. Conforme Santos (2006), a permeabilidade pode ir

desde 10^2 cm/s para materiais que possuem uma elevada condutividade hidráulica (ou seja, permitem o fluxo de água muito facilmente), até valores tão baixos quanto 10^{-12} cm/s para aqueles com baixíssima condutividade. Geralmente, esses materiais de baixa condutividade são solos ricos em argila, especialmente aqueles com alta atividade coloidal, que formam uma barreira mais eficaz ao movimento da água.

Caracterizado como uma propriedade fundamental dos solos que define sua capacidade de permitir o escoamento de fluidos, especialmente da água, através de seus poros. Essa característica está diretamente relacionada à estrutura do solo, à granulometria, à distribuição e à interconectividade dos vazios (CAPUTO, 2000). Solos com maior porosidade e com partículas de maior diâmetro, como areias, tendem a apresentar maior permeabilidade em comparação a solos finos, como as argilas, cuja compactação reduz os vazios e dificulta o fluxo de água (DAS; SOBHAN, 2018)

Do ponto de vista da engenharia, a determinação do coeficiente de permeabilidade (k) pode ser feita por meio de ensaios de laboratório, como o permeâmetro de carga constante e o de carga variável, além de métodos em campo, como os testes de infiltração, também podem ser utilizados para empregar a permeabilidade (BRAJA M. DAS, 2007). Franceschet (2006), detalha os ensaios com o uso do permeâmetro:

- Permeâmetro a carga constante: método utilizado em casos em que o solos são predominante em areia e possui elevada permeabilidade. O coeficiente de permeabilidade é determinado pelo calculo da Lei de Darcy, conforme a Equação 4:

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot h \cdot t} \quad (4)$$

onde:

Q = quantidade de água que atravessou a amostra (cm^3);

A = área da seção do permeâmetro (cm^2);

L = altura da amostra (cm);

h = carga hidráulica dissipada durante a percolação (diferença anotada entre entrada e saída de água) (cm);

t = tempo decorrido para a coleta da quantidade de água.

- Permeâmetro a carga variável: utilizado para solos com menores níveis de permeabilidade, com predominância de solos argilosos. Neste método mede-se o

tempo t que o líquido no tubo leva para percorrer a altura inicial e altura final, conforme a Equação 5:

$$k = 2,3 \frac{a \cdot H}{A \cdot \Delta t} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (5)$$

onde:

k = coeficiente de permeabilidade (cm/s);

a = área interna da seção transversal do tubo de vidro (cm²);

H = altura inicial do corpo de prova (cm²);

A = área da seção transversal do corpo de prova (cm²);

Δt = diferença entre os instantes t_2 e t_1 (s);

h_1 = altura da coluna d'água no instante t_1 (cm);

h_2 = altura da coluna d'água no instante t_2 (cm).

O grau de permeabilidade é uma classificação qualitativa do solo com base no valor no coeficiente de permeabilidade (k). Essa classificação ajuda a entender se um solo permite ou não a passagem de água com facilidade (Lambe e Whitman, 1969). Segundo os autores, os solos podem ser classificados conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Grau de permeabilidade

Grau de permeabilidade	Coeficiente de permeabilidade k (cm/s)
Alta	$k > 10^{-1}$
Média	$10^{-1} < k \leq 10^{-3}$
Baixa	$10^{-3} < k \leq 10^{-5}$
Muito baixa	$10^{-5} < k \leq 10^{-7}$
Praticamente impermeável	$k \leq 10^{-7}$

Fonte: Lambe e Whitman (1969).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Atividade de campo

Inicialmente, foram feitas visitas entorno do lixão municipal de Imperatriz, observando a formação pedológica predominante da região e a comparando com as características pedológicas do mapa.

4.1.1 Amostragem de solo

Para a escolha do ponto de coleta de amostragem do solo, levou-se em conta os seguintes critérios:

- Características observadas em campo e relatada como predominante pelo mapa de pedologia divulgado pelo IBGE (2011), apresentado no Anexo C;
- Acessibilidade do local de coleta com o veículo disponível;
- Ausência de pedregulhos, a fim de avaliar a predominância de argila presente na amostra.

A coleta da amostra de solo ocorreu na região pedológica de Luvisolos Háplicos Órticos. Realizada a extração a uma distância a aproximadamente 300 metros do local de descarte de resíduos de Imperatriz – MA, sendo acessado por uma estrada pavimentada de asfalto e logo em seguida de estrada vicinal, nas seguintes coordenadas 47°32'29.8" W, 5°25'44.8". O solo foi extraído até 1 metro de profundidade, com objetivo de coletar o solo abaixo da camada de matéria orgânica, para evitar interferências compostos orgânicos durante as análises.

4.1.2 Amostragem

A amostra foi coletada de forma deformada, seguindo as orientações da NBR 6457 (ABNT, 2016). O solo foi extraído até 1 metro de profundidade, com objetivo de coletar o solo abaixo da camada de matéria orgânica, para evitar interferências de matérias orgânicas nas análises. Logo em seguida, foi armazenada no Laboratório de Geologia e Hidráulica da UEMASUL no Campus CCHSTL em Açailândia – MA, no

semestre de 2023.1. O solo foi seco a exposição do ar e estabilizado na peneira de 4,8 mm e armazenados em sacos plásticos.

4.1.2 Amostra de bentonita

A amostra de bentonita usada é oriunda da marca BRX Minérios, de coloração bege claro, do tipo sódica, foi disponibilizada um total de 5 kg de argila bentonítica pela empresa Franco Engenharia.

Segundo o fabricante, a amostra de bentonita possui alta capacidade de troca catiônica (CTC) e um pH na faixa de 8.5 a 10.0. É comumente usada na engenharia para perfuração de poços, fundações e impermeabilização. Foi realizado os ensaios de Azul Metileno e DRX, a fim de obter a composição mineralógica do material.

4.2 Ensaio de laboratório

4.2.1 Coleta e preparação das amostras

Para caracterização e classificação do solo da pesquisa, a amostra foi preparada respeitando as normativas estabelecidas pela NBR 6457 (ABNT, 2016). Foram secas ao ar e, logo em seguida, foi realizado o quartejamento e o destorroamento de modo que não houvesse a quebra de partículas e nem alteração na granulometria do material.

Para os ensaios adversos, foram seguidas as metodologias individuais prescritas para cada, ao qual foram reproduzidas na atualidade, em maioria por pesquisadores brasileiros, devido as especificidades dos Solos Tropicais.

4.2.2 Caracterização das amostras

Para a caracterização das amostras, foram realizados os seguintes ensaios de acordo com suas respectivas normativas brasileiras:

- Preparação das Amostras – NBR 6457 (ABNT, 2016)
- Análise Granulométrica – NBR 7181 (ABNT, 2018) tamponada com Carbonato de Sódio e com dispersor químico Hexâmetro Fosfato;
- Determinação do Teor de Umidade dos Solos – NBR 6457 (ABNT,2016)

- Determinação do Limite de Liquidez – NBR 6459 (ABNT, 2017)
- Determinação do Limite de Plasticidade – NBR 7180 (ABNT, 2016)
- Compactação na Energia Proctor Normal – NBR 7182 (ABNT, 2016)
- Determinação do Grau de Acidez – NBR 9252 (ABNT, 2016);
- Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C - Método de ensaio - NBR 13600 (ABTN, 2022);
- Caracterização mineralógica por Difração de Raios X em Pó em um difratômetro da PANalytical modelo Empyrean, operando com radiação Cu K α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), geometria Bragg-Bretano, utilizando passo angular de 0,02° a cada 2 segundos, em intervalo angular de 5-95°. O ensaio será realizado no Laboratório de Difração de Raios X (LDRX) no Centro de Ciências Sociais, da Saúde e Tecnologia (CCSST) da Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

Ademais, foi realizado definições de características geotécnicas juntamente com sistemas de classificações definido pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), descrito no item 3.9.1, objetivando comparar com a característica de tipologia estimado pelo mapa pedológico estadual disnibilizado pelo IBGE (2011).

4.2.3 Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno pelo Método da Mancha (Fabbri, 1994)

A análise de porção fina dos solos será complementada pelo método de Adsorção de Azul de Metileno, detalhado no Anexo A. De forma sucinta, o ensaio envolve a titulação de uma suspensão de solo e água com uma solução padronizada do adsorvente azul de metileno (com uma proporção específica de 1 grama de azul de metileno para 1,00 litro de água destilada). Com isso, a titulação é realizada até atingir o ponto de saturação, no qual uma certa quantidade de corante é adicionada à mistura usando um gotejador, sob papel filtro padronizado.

Neste trabalho, foi realizado a verificação do comportamento do solo sob duas condições, uma na condição da amostra em seu estado natural, e outra na condição calcinada exposta a um período de 12 horas a 440 °C em mufla, esta condição tem como objetivo a remoção de matéria orgânica presente nas amostras e foi executado tendo como base as diretrizes estabelecidas pela NBR 13600.

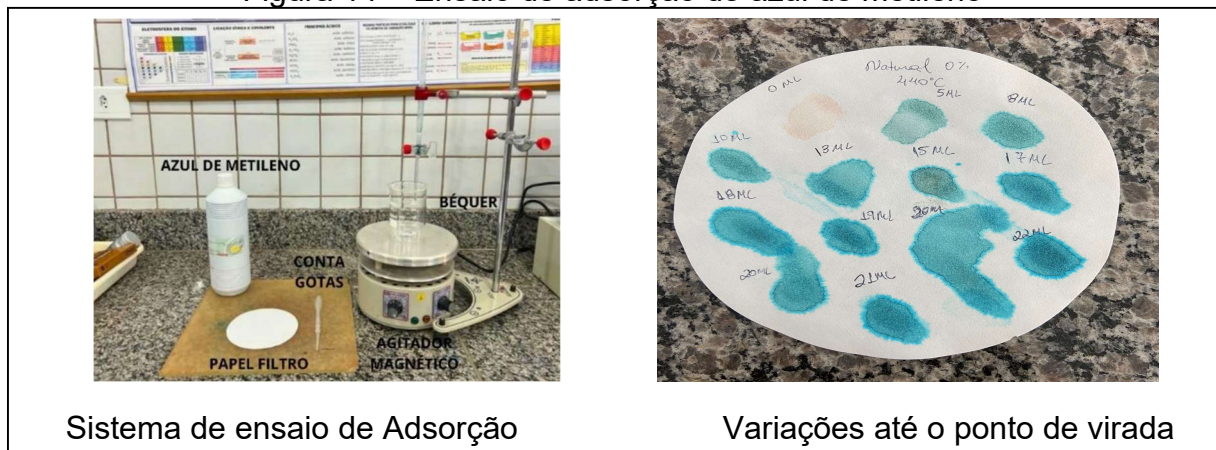
Para ambas condições, foram realizadas a determinação de atividade mineral, proposto pelo método de Fabbri (1994), alinhado com as normativas francesas NF – 94068 (1998), totalizando 2 análises sendo determinadas por:

- Adsorção de azul de metileno com amostra natural;
- Adsorção de azul de metileno com amostra calcinada, a temperatura constante de 440 °C por 12 horas;

O método proposto por Fabbri (1994) incide na titulação de uma suspensão contendo 1 g de solo fino (partículas com diâmetro inferior a 0,074 mm) em 100 mL de água destilada, sob agitação constante, com uma solução padronizada de azul de metileno. A adição do corante é realizada de forma controlada, à razão de 1 mL por minuto, até que atinja o ponto de saturação com aparição da mancha.

Durante o ensaio, após cada ciclo de adição do corante, retira-se uma gota da suspensão com o auxílio de um conta-gotas, depositando-a sobre um papel filtro quantitativo padronizado (papel filtro redondo, com diâmetro entre 120 e 150 mm, adequado para retenção de microcristais, com teor de cinzas inferior a 0,01%, do tipo Whatman 42 ou equivalente), conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Ensaio de adsorção de azul de metileno



Sistema de ensaio de Adsorção

Variações até o ponto de virada

Fonte: Autoria própria (2025).

A avaliação do ponto de saturação foi feita pela observação da mancha no papel filtro: considera-se atingido o ponto de saturação quando um halo azul claro começa a se formar ao redor da mancha central azul-escura, indicando que todo o corante livre não está mais sendo adsorvido pelas partículas do solo.

Para a classificação com base no sistema adaptado por Fabbri (1994), foi avaliado o volume de azul metileno consumido por 1g de cada amostra (VA), o

chamado ponto de saturação, e os coeficientes de atividade (CA) indicado para cada situação.

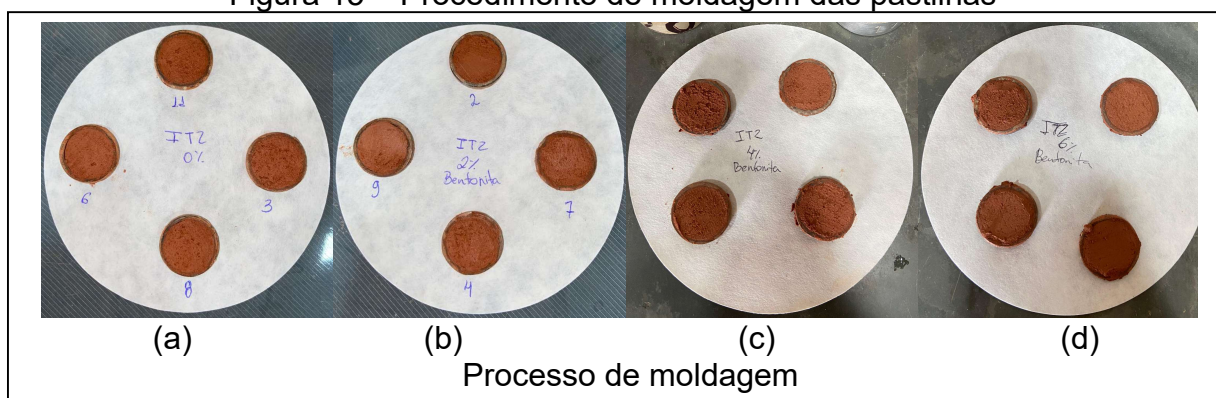
4.2.4 Classificação MCT pelo Método das Expedito Pastilhas Nogami e Villibor (1994)

Classificação MCT (Miniatura, Compactação, Tropical), desenvolvida por Nogami e Villibor (1994) pelo método das pastilhas, é uma ferramenta importante na engenharia civil para categorizar solos tropicais. Essa metodologia avalia o comportamento e as propriedades físicas desses solos, sendo amplamente aplicada na determinação da viabilidade de solos para projetos de pavimentação e fundação. É particularmente útil devido à prevalência de solos lateríticos e saprolíticos em regiões tropicais.

Com o objetivo de caracterizar as amostras na metodologia MCT, foi empregado o método Expedito das Pastilhas de Nogami e Villibor (1994), detalhado no Anexo B. Para isso, foi realizado 4 amostras de solo, natural e com adições de teores de bentonita (2%, 4% e 6%), em 4 pastilhas e 4 aferições analisando a contração média e penetração em cada condição.

Para a execução do ensaio MCT, as pastilhas são moldadas dentro de anéis de aço inoxidável, medindo 20 mm de diâmetro e 5 mm de altura. Utiliza-se solo que tenha passado por uma peneira de malha de 0,42 mm. A moldagem ocorre a partir de uma pasta de solo, preparada com aproximadamente 100 g do material. Essa pasta é espalhada sobre uma placa de vidro esmerilhado e manipulada até que atinja uma consistência específica, permitindo uma penetração de 1 mm.

Figura 15 – Procedimento de moldagem das pastilhas

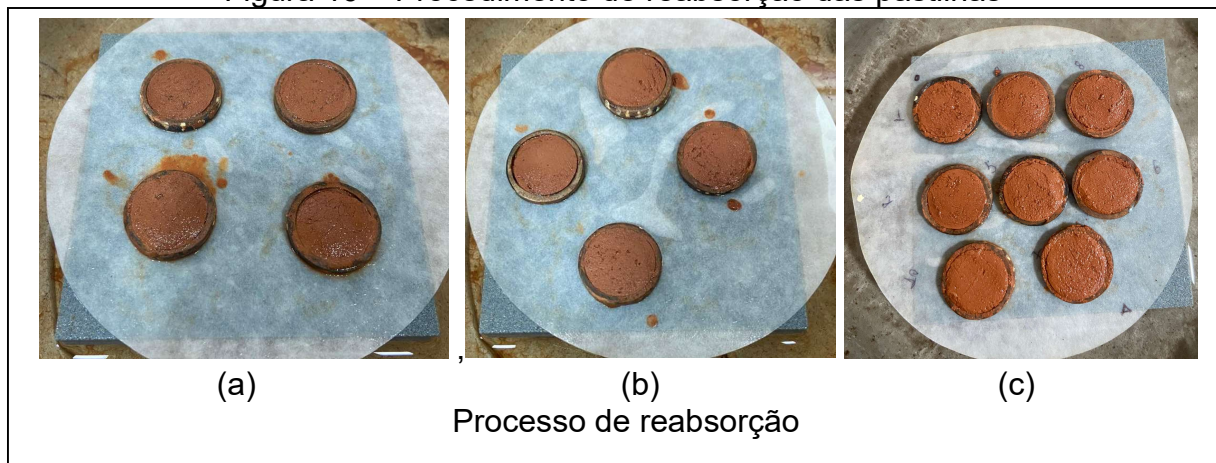


Fonte: Autoria própria (2025).

Na Figura 15 é demonstrado o processo de moldagem dos anéis, sendo o (a) amostra natural, (b) amostra com adição de 2% de bentonita, (c) amostra com adição de 4% de bentonita e (d) amostra com adição de 6% de bentonita

Após a moldagem dos corpos de prova (CP), as pastilhas são secas em ambiente controlado por 24 horas. Em seguida, são aferidas as medidas de diâmetro das pastilhas com o uso de um paquímetro, avaliando o nível de contração. Finalmente, os CPs são saturados por 2 horas, posteriormente à saturação, é medida a resistência à penetração de uma agulha com dimensões de 1,3 mm, pesando 10 gramas.

Figura 16 – Procedimento de reabsorção das pastilhas



Fonte: Autoria própria (2025).

Na Figura 16 é demonstrado o processo de moldagem dos anéis, sendo o (a) amostra natural, (b) amostra com adição de 2% de bentonita e (c) amostra com adição de 4% e 6% de bentonita.

Para a classificação será usado a carta de classificação expedita das pastilhas, onde, associa o grau de contração do solo com a determinação classificatória Miniatur Compactada Tropical – MCT relacionando o contração e a penetração das amostras, estabelecendo o grupo característico pertencente a cada solo, possibilitando assim, determinar o comportamento de cada amostra analisada.

4.2.5 Técnica de Difração de Raio X (DRX)

Para análise e verificação que a síntese possui estrutura cristalina, a amostra será submetida à técnica de Difração de Raios X em Pó (DRXP) em um difratômetro

da PANalytical modelo Empyrean, operando com radiação Cu K α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), geometria Bragg-Bretano, utilizando o passo angular de $0,02^\circ$ a cada 2 segundos, em intervalo angular de $5-95^\circ$. O ensaio será realizado no Laboratório de Difração de Raios X (LDRX) no Centro de Ciências Sociais, da Saúde e Tecnologia (CCSST) da Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

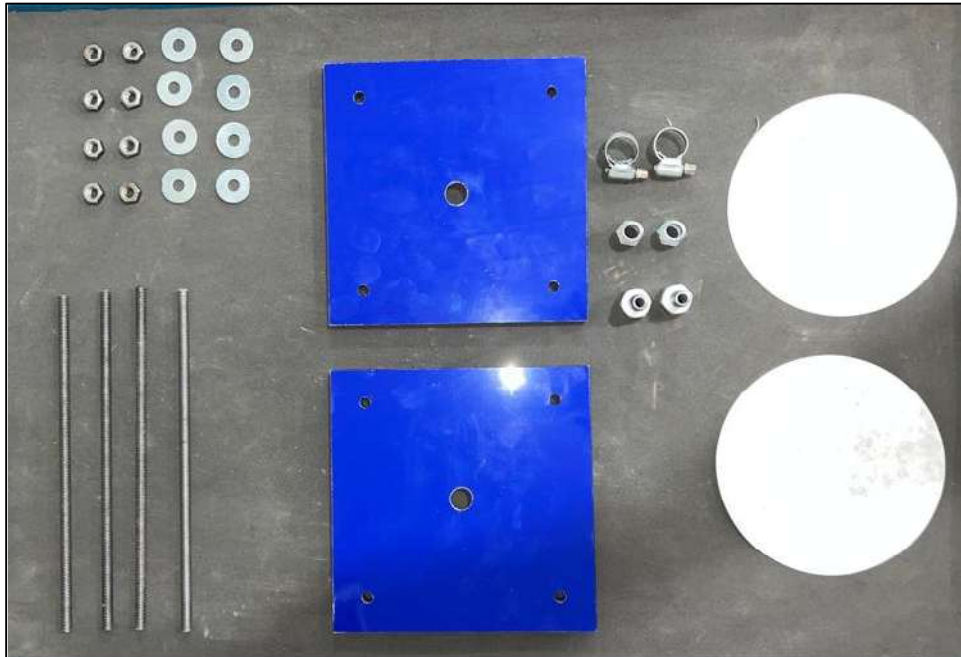
A mudança no ângulo de incidência de um feixe de raios X emitido por uma fonte de radiação registra as reflexões produzidas pela disposição dos átomos nos planos cristalinos dos minerais, registradas pelo detector e mostradas em um diagrama, conhecido como difratograma de raios X. Este diagrama associa a força da difração dos raios emitidos ao ângulo de incidência da radiação, exibindo um padrão exclusivo para cada espécie mineral, atuando como um sinal de sua singularidade. Assim, é possível identificar os componentes cristalinos numa combinação particular de materiais, ao comparar os reflexos (ou picos) exibidos no difratograma de raios X correspondente com os padrões de difração dos vários minerais.

4.2.6 Ensaio de Permeabilidade à Carga Variável

Para o ensaio de permeabilidade foi escolhido o método da permeabilidade com carga variável, onde o coeficiente de permeabilidade é determinado conforme a Equação 5 citada anteriormente.

Foram aferidos os coeficientes de permeabilidade processando a NBR 14545 (2021), havendo uma adaptação em seus métodos, sendo o sistema de ensaio e desenvolvimento do equipamento foram baseados no trabalho de Romanini e Benatti (2015), sendo composto por buretas para medição do fluido percolado, permeômetros de parede rígida, manta geotêxtil para a regularização das camadas em medidas padronizadas. Além disso, foi usado barras roscadas, porcas, arruelas, bico injetor para conexão das mangueiras de $\frac{1}{4}$ " e isolamento com placas de ACM. O projeto de desenvolvimento do permeômetro está apresentado no Apêndice D. A Figura 17 demonstra os materiais utilizados.

Figura 17 – Construção do permeômetro de carga variável para a pesquisa



Fonte: Autoria própria (2025).

Para cada amostra foram compactados em 6 corpos de prova em condição de umidade ótima obtida (W_{ot}) no ensaio de compactação a energia normal de proctor, sendo ensaada em condição natural (I00) e com diferentes teores de argila bentonita (I02, I04 e I06), totalizando 24 CPs.

A saturação das amostras aconteceu por meio de contrapressão, através de um sistema de fluxo ascendente dos fluidos, através de um sistema ligados em torneiras com vazão reduzida.

Figura 18 – Etapas de ensaio de permeabilidade



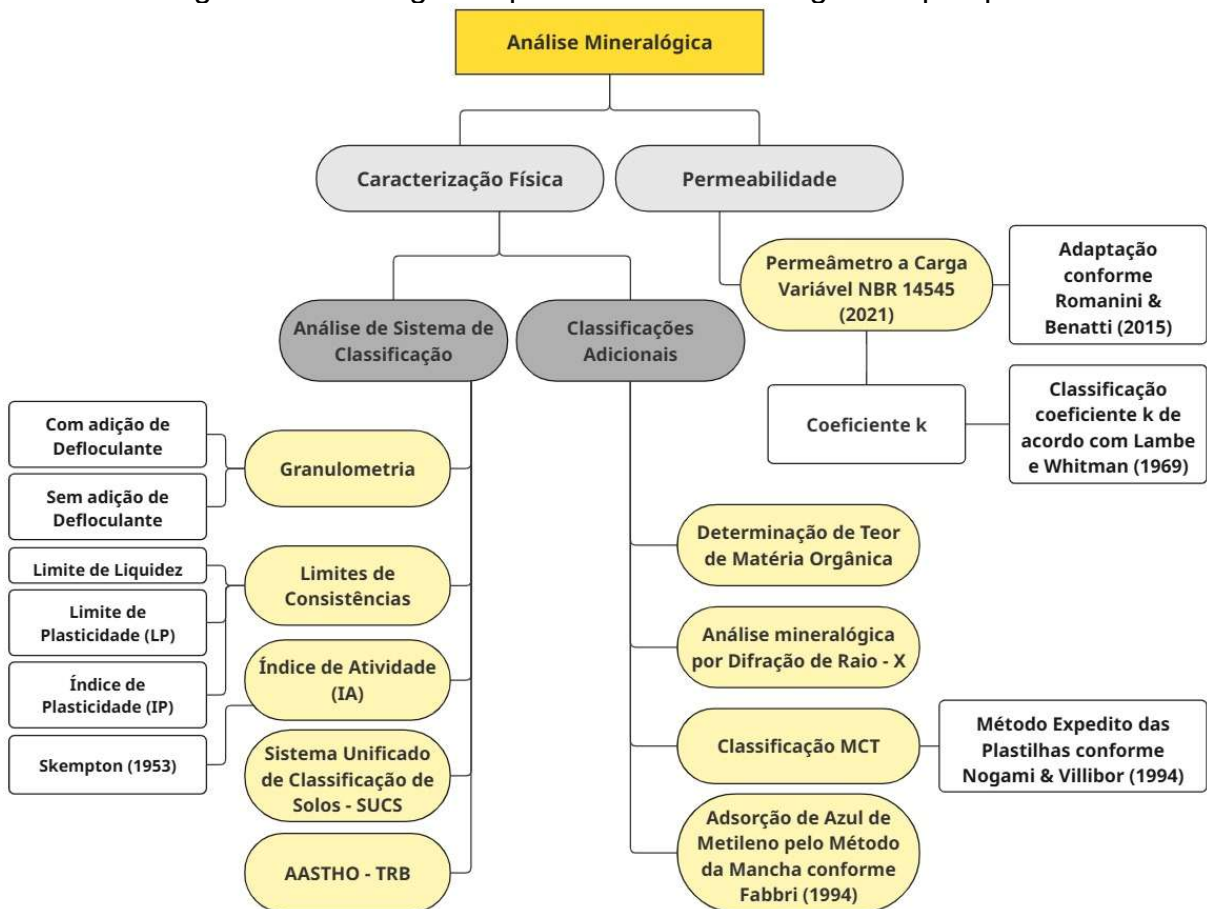
Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 18 ilustra o arranjo experimental da bancada de ensaio. Nela, os permeâmetros estão conectados a um sistema projetado para a saturação dos corpos de prova. Após a etapa de saturação, esses corpos de prova são transferidos para a fase de medição. Durante essa fase, observa-se a queda de água em uma bureta, um dado essencial que permitirá determinar o coeficiente de permeabilidade do material.

4.3 Método de análise de dados

A análise do solo ocorreu a partir da obtenção de parâmetros geotécnicos e determinações mineralógicas da amostra, usando ensaios normativos e modelos diversos de caracterização, sendo executado ensaios conforme o fluxograma apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Fluxograma para estudo mineralógico da pesquisa



Fonte: Autoria própria (2025).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico, serão apresentados os resultados obtidos a partir da condução de ensaios e métodos definidos para o estudo proposto da amostra de solo. Esses resultados foram subdivididos em Ensaios de caracterização, e Método Expedito das Pastilhas e Permeabilidade e Análise de correlação dos resultados gerais.

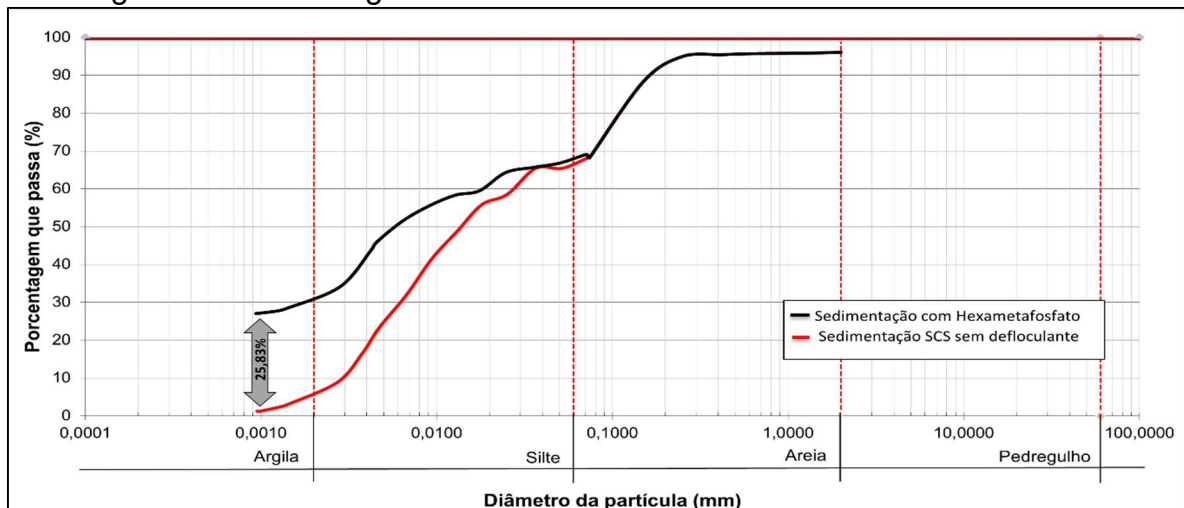
5.1 Caracterização das amostras

Para a caracterização das amostras, será apresentado os ensaios de Granulometria conjunta com a sedimentação, Limites de Consistências, Grau de Acidez, Grau de Teor de Matéria Orgânica por queima a 440°C, Análise Mineralógica por DRX, e o Ensaio de Azul de Metileno.

5.1.1 Granulometria Associada a Sedimentação

Nesta etapa, a amostra de solo foi processada no laboratório de geotecnia e hidráulica da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL). Com o objetivo de avaliar o comportamento da amostra sob diferentes condições de campo, a determinação granulométrica foi realizada sob duas condições de ensaio, com defloculante (dispersante químico Hexametáfosfato de Sódio em concentrações de 10 e 25 ml de solução de 0,04 g/l) e sem a adição de defloculante.

Figura 20 – Curvas granulométricas da amostra com e sem defloculante

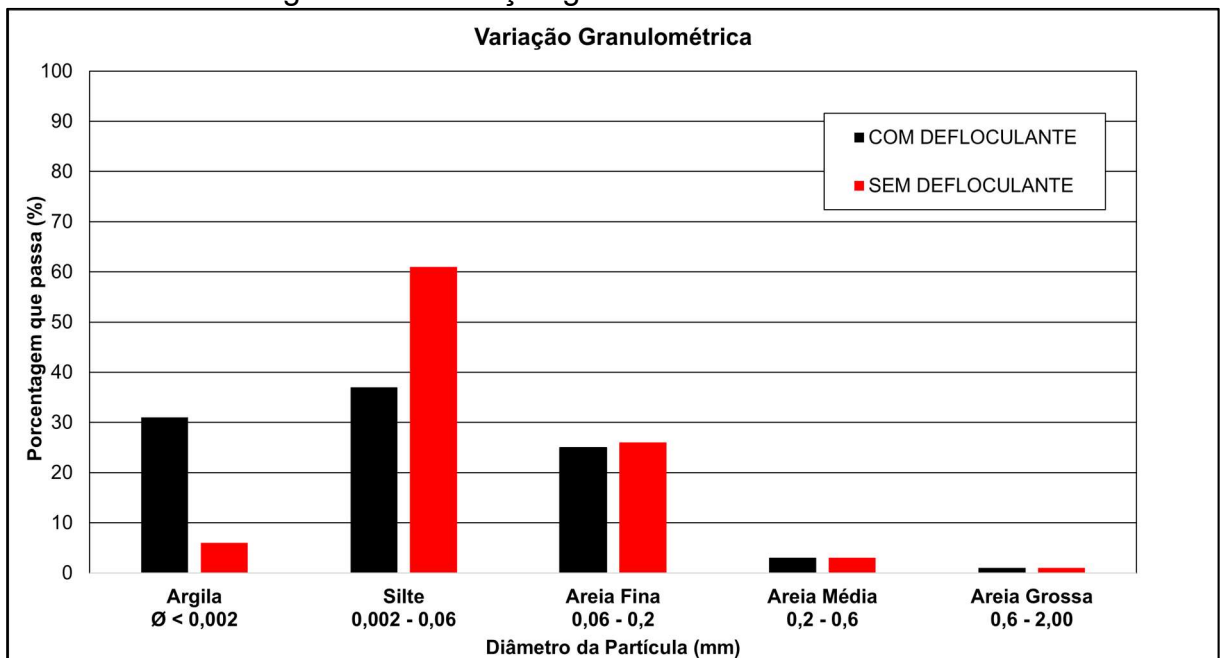


Fonte: Autoria própria (2025).

Observa-se na Figura 20, que a amostra apresentou maiores teores de argila com o uso do Hexametáfosfato de Sódio em comparação com o sem adição de defloculante, obtendo maior dispersividade dos resultados, apresentando uma variação média de 25,83% do teor de argila.

Observa-se que a média das determinações granulométrica da amostra de Luvissole, demonstrou que o defloculante foi determinante para quantificação das frações finas, a medida que o Hexametáfosfato aumentava a parcela das argilas, diminuía a parcela de silte, demonstrando que houve uma migração de partículas finas de argila, que não foram corretamente dispersas, como apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Variação granulométrica do Luvissole



Fonte: Autoria própria (2025).

Em uma análise geral, nota-se a influência do uso de defloculante na caracterização das frações finas do solo. A presença do defloculante promoveu uma dispersão mais eficiente das partículas de argila e silte, permitindo uma medição mais precisa de suas respectivas proporções. Sem o uso do defloculante, observou-se a formação de grumos de argila e silte que dificultou a dispersão da fração de argila do solo.

Por outro lado, nas frações de areia fina, média e grossa, as diferenças foram pouco expressivas indicando que o efeito do defloculante foi mais relevante nas partículas de menor diâmetro.

5.1.2 Limite de Consistência

Com o intuito de analisar a influência da adição de teores de argila bentonítica na amostra de solo deste trabalho, será apresentado na Tabela 3 os limites de consistência encontrados para as amostras ensaiadas, sendo uma amostra sem adição de bentonita como referência, e as demais com adições de 2%, 4% e 6%, respectivamente.

Tabela 3 – Limite de consistência das amostras analisadas

Solo	Golpes LL	Umd Ref LL (%)	LL (%)	LP (%)	LP (méd) (%)	IP (%)
Amostra	29	31,53		27,86		
	18	33,75	32,63	28,46	28,415	4
	23	33,18		28,42		
	22	33,8		28,92		
	18	35,91		20,24		
19	34,78	33,8	20,03			
Amostra + 2%	23		34,49	22,31	21,04	13
	28		33,01	21,18		
Amostra + 4%	20	40,08		22,61		
	25	39,6	39,45	21,12	20,89	19
	17	40,49		20,92		
	24	39,53		18,31		
	24	40,75		20,47		
Amostra + 6%	23	40,65	40,34	21,74		
	19	42,49		21,58		
	18	41,93	21,52			

*LL – Limite de Liquidez

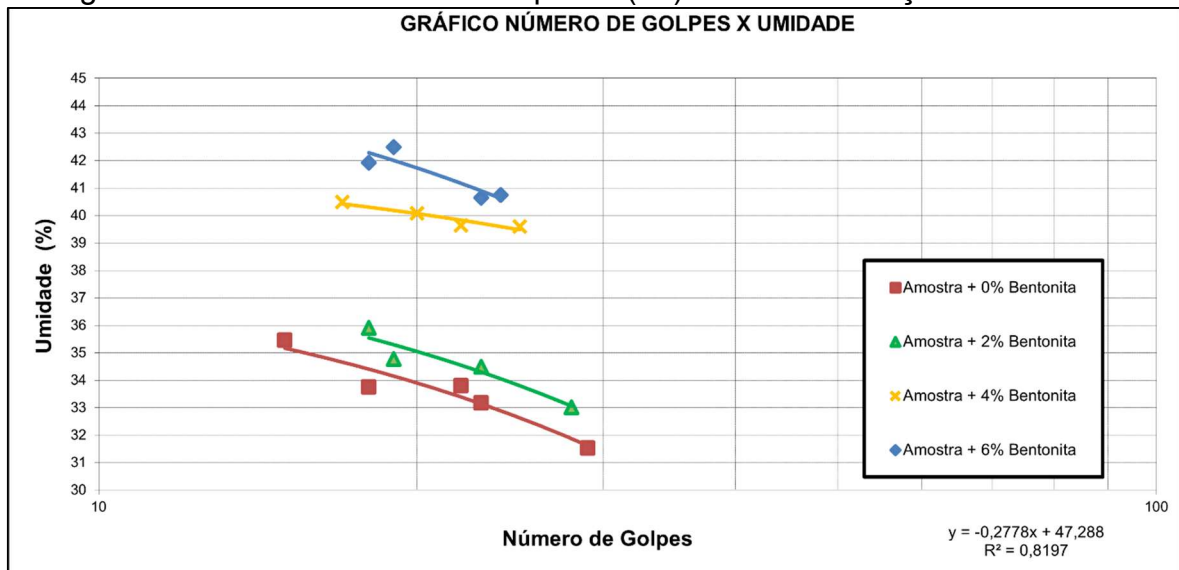
*LP – Limite de Plasticidade

*IP – Índice de Plasticidade

Fonte: Autoria própria (2025).

Na Figura 22, é possível observar uma variação significativa no comportamento do limite de liquidez da amostra de referências e com a adição dos teores de bentonita. A medida que o teor do argilomineral aumenta, também ocorre o aumento da umidade associada ao limite de liquidez, este fato ocorre devido a alta capacidade de absorção de água da bentonita, por ser um mineral expansivo, conseqüentemente eleva os limites de consistência.

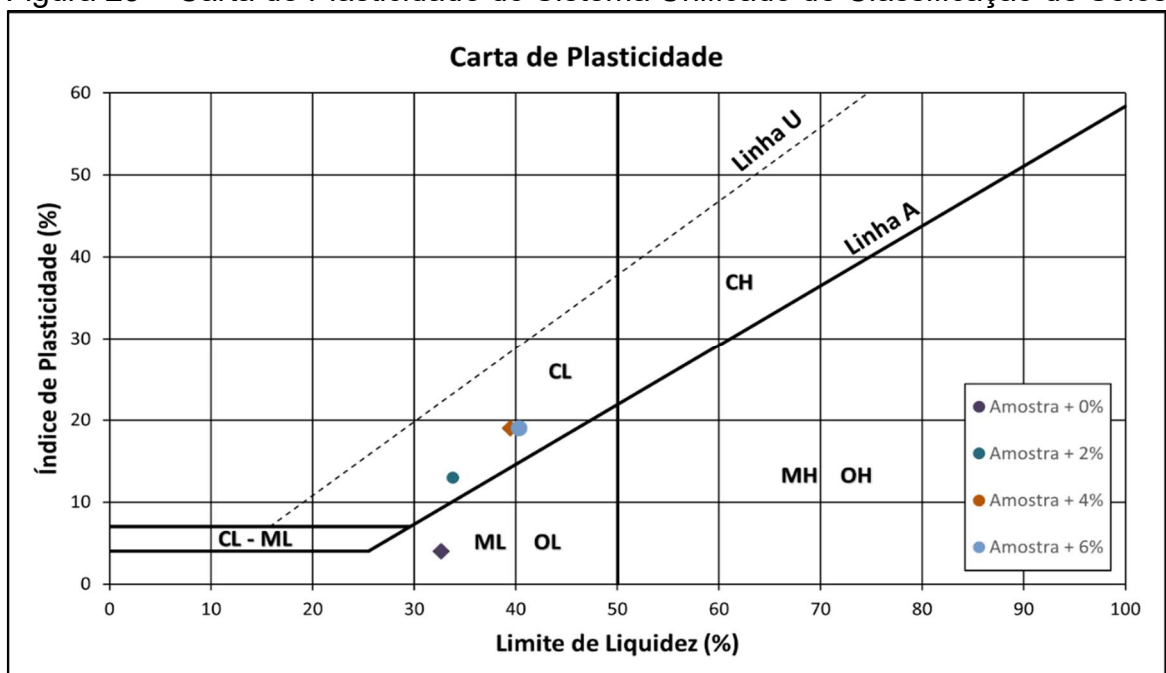
Figura 22 – Gráfico do limite de liquidez (LL) com e sem adição de bentonita



Fonte: Autoria própria (2025).

Seguindo os resultados de consistências por cada amostra, classifica-se a amostra, segundo o sistema de classificação TRB, o Luvissole sem adições classifica-se como um solo pertencente ao grupo A-4, predominante de silte com comportamento fraco a pobre. A medida que a bentonita é adicionada esta classificação muda, chegando a ser do grupo A-6, passando a ser um solo de composição argilosa, mas ainda com o comportamento fraco a pobre.

Figura 23 – Carta de Plasticidade do Sistema Unificado de Classificação de Solos



Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 23, demonstra a classificação das amostras pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), utilizando o gráfico da Carta de Plasticidade originado pelos resultados do limite de liquidez e o índice de plasticidade das amostras.

A amostra coletada se apresenta, de acordo com a carta de plasticidade, como um silte de baixa compressibilidade (ML). Porém, com a adição da argila bentonita a amostra se classifica como uma argila com baixa compressibilidade. Este comportamento foi esperado, considerando que a argila possui propriedade de elevada plasticidade, e ao ser adicionado teores desse material, eleva a plasticidade e o limite de liquidez, alterando seu comportamento físico.

Em função dos resultados obtidos da consistência do solo, foi possível analisar a alteração provocada no índice de atividade (IA) das argilas em cada teor de adição. Este índice é proposto por Skempton (1953), e serve para avaliar a reatividade da fração de argila de um solo, fornecendo uma ideia de qualidade mineralógica da argila, especialmente a capacidade de expansão, retração, absorção de água e coesão. É determinado a partir correlação entre o IP e o percentual de argila presente no solo, apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Índice de atividade da amostra

Solo	Teor de Bentonita	*IP (%)	Argila (%)	*IA	Skempton (1953)
Amostra	0%	4	31	0,129	Baixa atividade
	2%	13	31,62	0,411	Baixa atividade
	4%	19	32,24	0,589	Baixa atividade
	6%	19	32,86	0,578	Baixa atividade

*IP – Índice de Plasticidade

*IA – Índice de Atividade

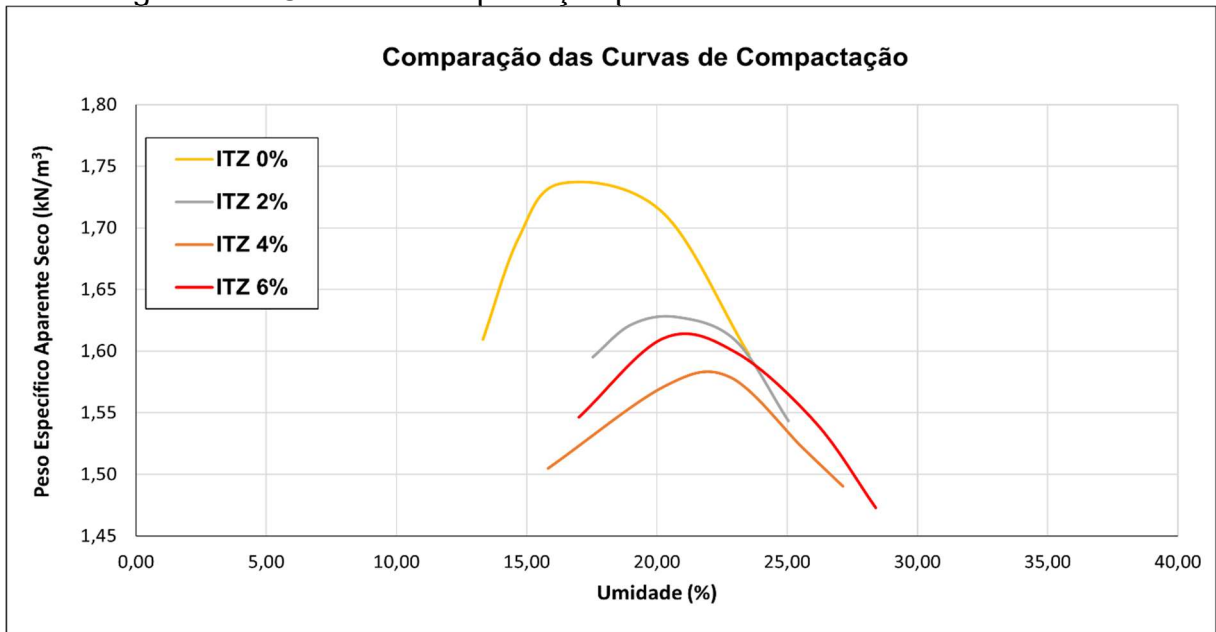
Fonte: Autoria própria (2025).

A avaliação do Índice de Atividade (IA), apesar de todas as classificações resultarem em argilas de baixa atividade, os resultados demonstrou que a adição de bentonita ao solo natural promoveu um aumento significativo da atividade da fração argila, evidenciando o efeito do argilomineral.

5.1.3 Compatação a Energia de Proctor Normal

As amostras desenvolvidas apresentam diferentes curvas de compactação e por consequência, valores de massa específica seca máxima e valor de umidade ótima se divergem a partir das adições de teor de bentonita ao solo natural. A Figura 24 apresenta as curvas de compactação obtidas para as amostras ensaiadas. A Tabela 5 destaca os parâmetros geotécnicos obtidos a partir da curva de compactação.

Figura 24 – Curva de compactação para as amostra de solo e misturas



Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 5 – Parametros geotécnicos das amostras compactadas natural e com diferentes teores de bentonita

Resultados Gerais da Compactação				
Amostra	Teor de umidade ótimo (%)	Peso específico seco máximo (Kn/m³)	Índice de Vazios	Porosidade (%)
Solo	18,22	1,75	0,43	69,96
Solo + 2% Bentonita	20,33	1,62	0,55	64,55
Solo + 4% Bentonita	21,60	1,60	0,56	63,91
Solo + 6% Bentonita	21,59	1,61	0,55	64,42

Fonte: Autoria própria (2025).

A partir dos resultados da compactação, é possível observar a diminuição da porosidade das amostras, isso se deve a característica do argilomineral expansivo

presente no aditivo, o que resulta nas mudanças da umidade ótima, que aumenta com o decorrer da adição.

5.1.4 Teor de Matéria Orgânica

O teor de matéria orgânica na amostra está apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Teor de matéria orgânica do solo de amostra

Amostra	Tara (g)	Amostra seca inicial (g)	Amostra seca calcinada final (g)	Teor de matéria orgânica (%)	Teor de matéria orgânica médio (%)
	81,70	91,71	91,46	2,50	
Luvissolo	85,47	95,52	95,14	3,78	3,25
	84,69	94,74	94,39	3,48	

Fonte: Autoria própria (2025).

Diante do teor de matéria orgânica 3,25% apresentado na Tabela 6, um valor consideravelmente baixo, entende-se que o objetivo em coletar a amostra de solo com 1 metro de profundidade foi eficaz. A matéria orgânica tem o potencial de alterar os resultados de atividade coloidal do solo, alterando também os resultados do comportamento geotécnico.

5.1.5 Grau de Acidez

Para a determinação do grau de acidez do solo, realizou-se o ensaio de determinação de pH, em 3 amostras de 10g para a aferição com o uso de soluções padrão de pH entre 6,00 e 8,00, conforme é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Determinação do pH da amostra

Caracterizações	Amostra		
Massa do solo (g)	10,082	10,033	10,074
Volume de água destilada (ml)	25	25	25
pH H₂O	8,3	8,5	8,7
pH médio H₂O		8,5	
pH da amostra de solo	5,1	5,2	4,9
pH Médio		5,07	
ΔpH (pH H₂O – pH da amostra)	3,2	3,3	3,8

Fonte: Autoria própria (2025).

Com os resultados do pH, compreende-se que mesmo com uma distância de 300 metros do local de descarte, a amostra apresentou variação no pH de solução neutra.

5.1.6 Mineralogia por Difração de Raios X

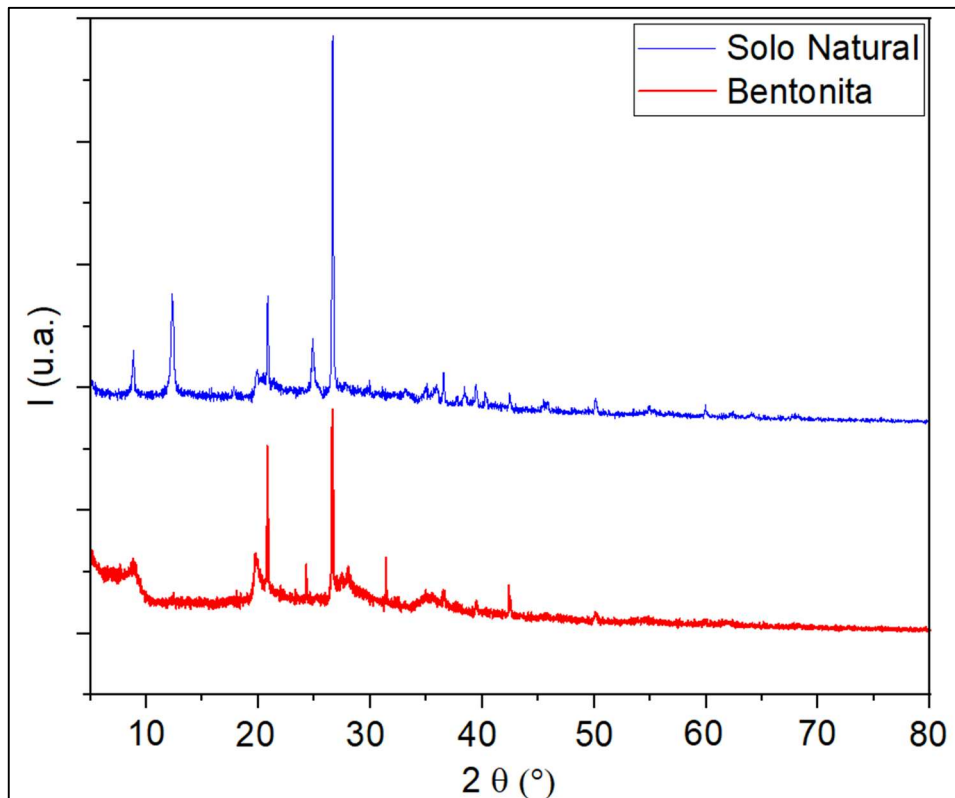
O ensaio foi realizado de forma triplica para cada amostra, e está apresentado de forma geral no Apêndice C. A partir da análise de mineralogia por difração de raios X é possível identificar os argilominerais presentes nas amostra. Diante disso, a Tabela 8 descreve as classificações obtidas das fases de difrações (Figura 25) encontradas nas amostras.

Tabela 8 – Classificações das fases por DRX

Referência no gráfico	Amostra	Fases Mineralógica
(a)	Solo Natural	Caulinita, Ilita e Geotita
(b)	Bentonita	Caulinita, Motmorilonita e Lepidolita

Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 25 – Mineralogia por Difração de Raios X da amostra base e da bentonita ambas calcinada a 400°C



Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 25 apresenta o difratograma usado para determinação das fases mineralógica do solo natural base da pesquisa e da argila bentonita (Tabela 8).

5.1.7 Adsorção de Azul Metileno pelo Método da Mancha

Os resultados de forma geral são apresentados no Apêndice B. Dessa forma, serão apresentados na Tabela 9 os resultados da aferições das amostras natural e das amostras calcinadas, ambas com as respectivas adições de teores de 2%, 4% e 6% de bentonita.

Tabela 9 - Dados da adsorção de Azul de metileno pelo método da mancha das amostras

Solo	Condição	%Arg. total do solo	Va* (g/g)	VB* (g/100g)	Acb* (VB/%Arg.)	CTC* (meq/100g)	SE* (m ² /g)
Amostra	Natural	47,70	17,14	1,20	1,71	1,20	29,35
	Calcinada a 440 °	47,70	27,20	1,30	1,85	1,30	31,73
Amostra + 2%	Natural	48,6	22,39	1,60	2,24	1,60	39,06
	Calcinada a 440 °	48,6	29,82	1,45	2,03	1,45	35,45
Amostra + 4%	Natural	49,6	30,20	2,20	3,02	2,20	53,76
	Calcinada a 440 °	49,6	28,11	1,39	1,92	1,39	34,11
Amostra + 6%	Natural	50,56	29,65	2,20	2,97	2,20	53,81
	Calcinada a 440 °	50,56	29,73	1,50	2,03	1,50	36,76

*Va – Valor de Azul de Metileno

*VB – Valor Blue

*Acb – Variação de azul da fração granulométrica de argila do solo

*CTC – Capacidade de troca catiônica

SE – Superfície Específica

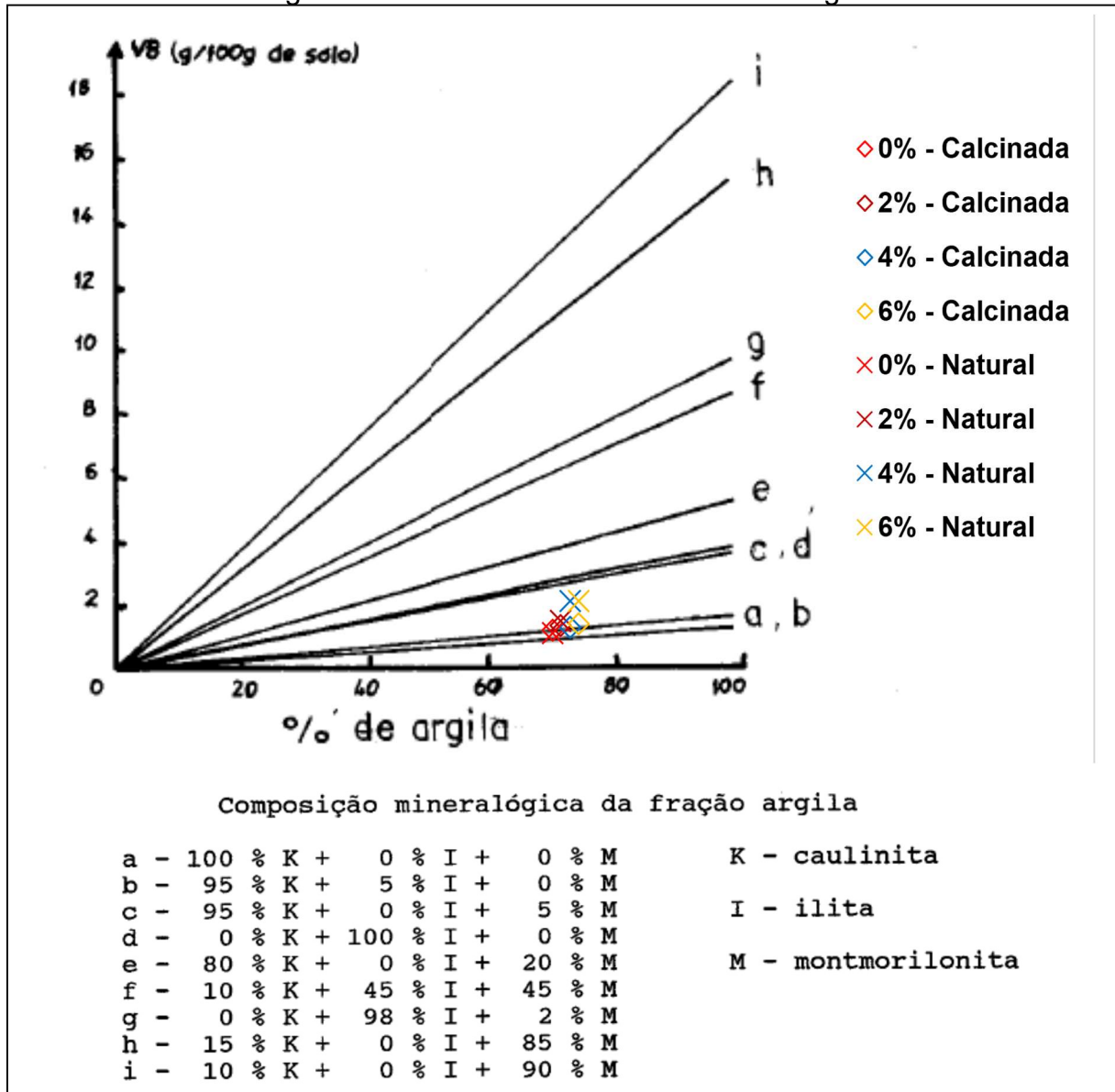
Fonte: Aatoria própria (2025).

Durante o ensaio, foi possível observar divergências em relação ao consumo do corante de azul metileno entre as amostras calcinadas e não calcinada. Em geral, para a amostra natural o consumo foi considerado maior comparado com a amostra calcinada.

A partir da relação de Valor Blue (VB) com a porcentagem passante de argilas, Lautrin (1987) propõe uma classificação que determina a composição mineralógica da fração de argila das amostras a partir de subdivisões em grupos. A Figura 26

apresenta esta carta de influência da mineralogia das argilas sobre a adsorção do azul de metileno, das amostras naturais e calcinadas a 440°C, ambas com adições de teores de bentonita pré-definido.

Figura 26 – Carta de influência da mineralogia



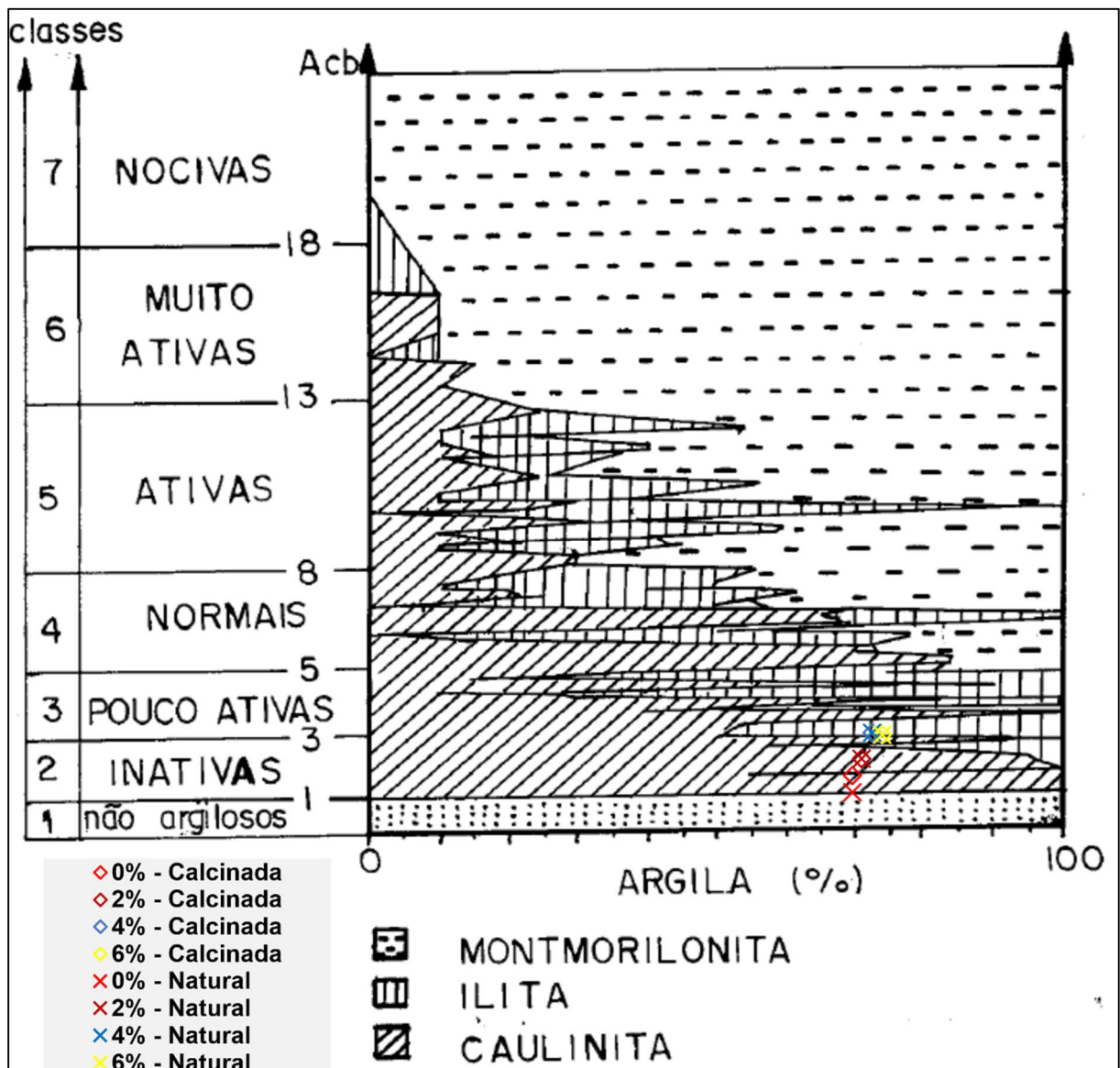
Fonte: Adaptado de Lautrin (1987).

Observa-se todos os pontos estão próximos da linha do grupo (b), representando 95% de caulinita e 5% de ilita na sua composição mineralógica. Entretanto, as amostras com adição de 4% e 6% não calcinadas, se aproximam do grupo (c), composto por 95% de caulinita e 5% de montmorilonita. Com isso, obtêm-se segundo a classificação de Lautrin uma presença predominante de caulinita que se confirma com o resultado obtido no DRX (apresentando anteriormente

na Tabela 8). Ressalta-se também, o surgimento da presença da montmorolinita, tal mineral é oriundo da argila bentonita.

Com base nesses preceitos, Lautrin (1989) elaborou um diagrama de classificação com intuito de caracterizar a fração fina estimando sua composição e índice de atividade das argilas, conforme é apresentado na Figura 27.

Figura 27 - Caracterização da atividade de toda a fração argila pelo método de Azul de Metileno



Fonte: Adaptado de Lautrin (1989).

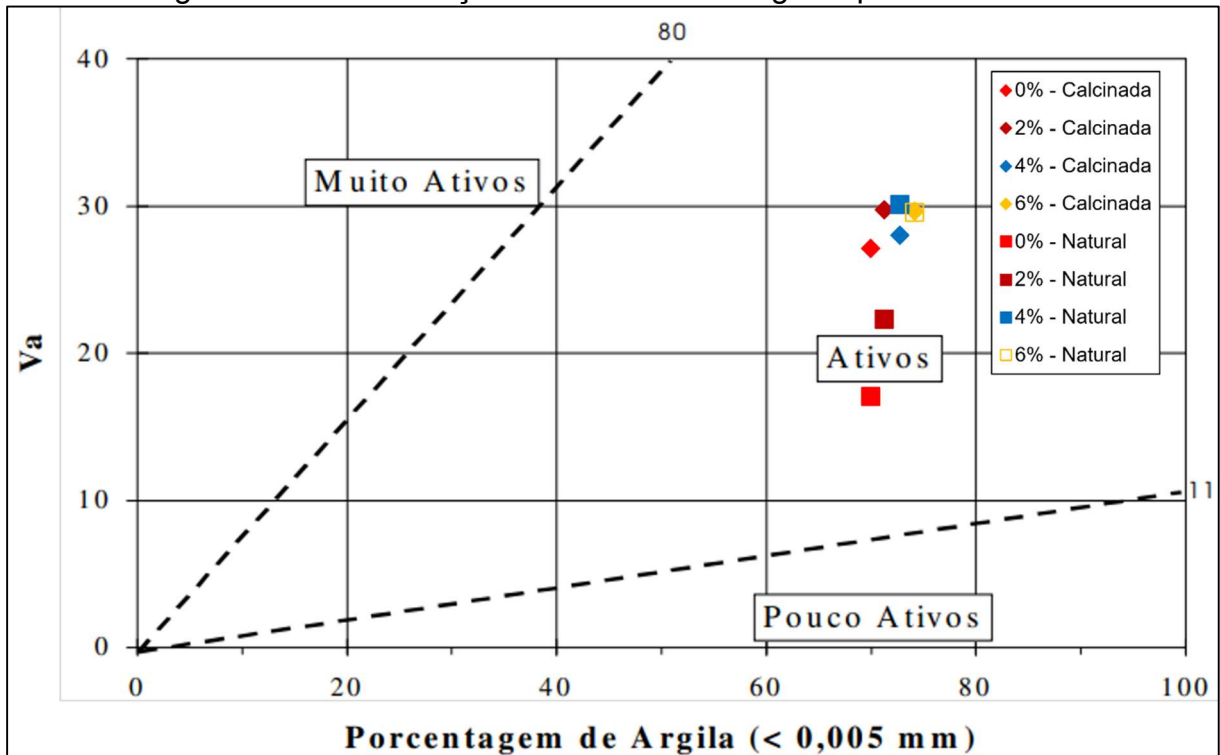
Seguindo esta representação de classificação de atividade das argilas finas, observa-se que mesmo com alto teor de argila presente nas amostras, a classificação da sua atividade é dada como inativas, ou seja, possui uma baixa atividade, mostrando

correlação com a classificação de Skempton (1953), apresentado anteriormente na Tabela 4.

Nota-se que o aumento da adição de teor de bentonita é diretamente proporcional com o aumento classificatório da atividade coloidal representado pelo ábaco de Lautrin (Figura 26). Esse fenômeno é resultado da presença dos argilominerais identificadas na argila bentonítica.

Divergente a estas classificações, Fabbri (1994) relaciona V_a com a porcentagem de argila, e propõe a classificação em três níveis, argilominerais muito ativos, ativos e poucos ativos, conforme apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Classificação da atividade da argila a partir do ábaco



Fonte: Adaptado de Fabbri (1994).

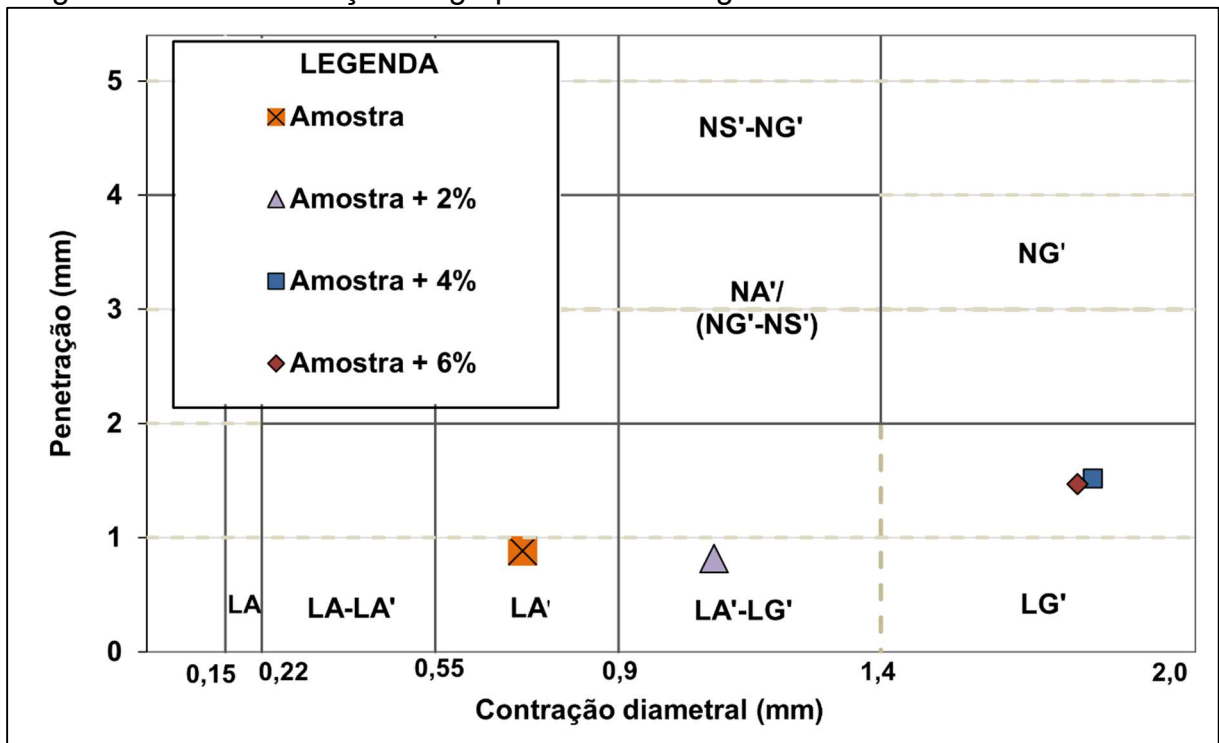
Observa-se que, a partir do ábaco proposto por Fabbri, as amostras possuem um comportamento ativo, sendo assim, os argilominerais abrangem os grupos de caulinitas e/ou ilitas.

O fato do ábaco proposto por Fabbri não englobar diferentes classificações, delimitando-se a 3 classificações, observa-se na comparação de resultados que a classificação da atividade é divergente da classificação de Lautrin, porém, em visão das classificações dos argilominerais presentes, os ábacos apresentam uma concordância, ambos identificam a presença de caulinita e ilita nas amostras.

5.2 Método expedito das pastilhas

Nogami e Villibor classificam os solos em dois grupos distintos, sendo os solos lateríticos (L) e os não lateríticos (N), a partir disso, complementasse essa divisão com subdivisões. Os resultados detalhados de contração e penetração obtidas para as amostras de solo natural e com adições de teores de 2%, 5% e 6% de bentonita são apresentando no Apêndice A, e suas respectivas classificação são demonstradas a partir da Figura 25.

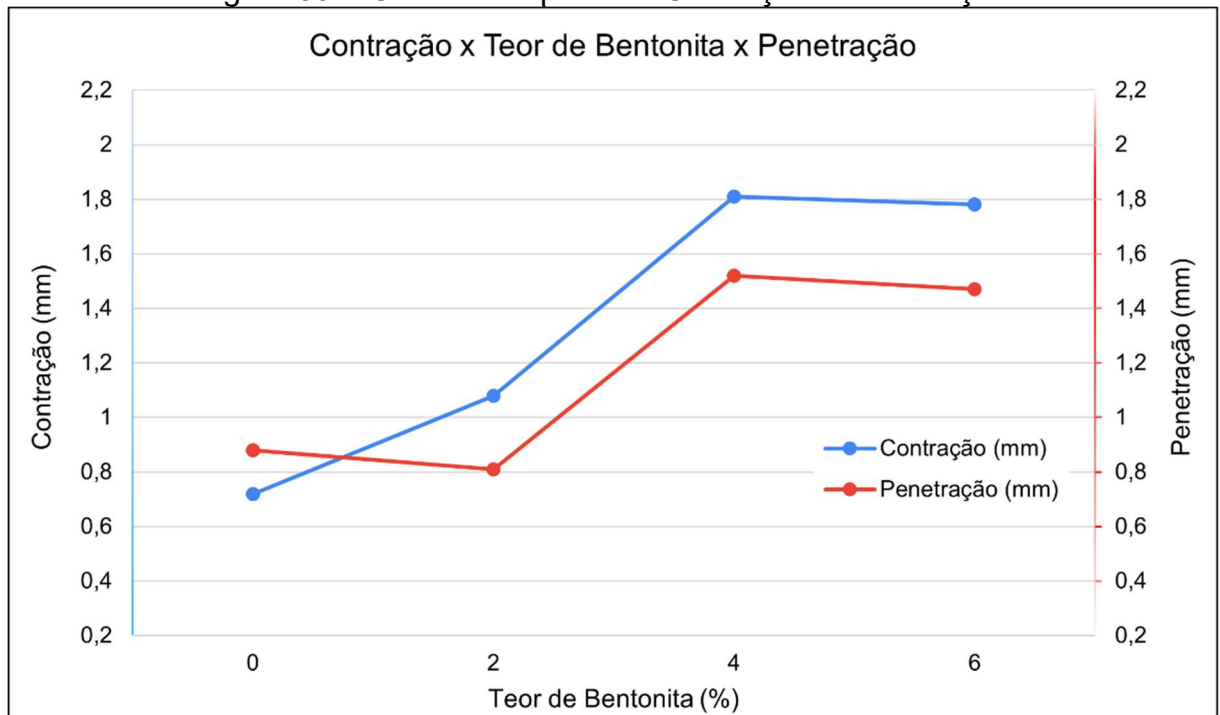
Figura 29 – Determinação do grupo da metodologia MCT das amostras ensaiadas



Fonte: Autoria própria (2025).

A partir da avaliação de Nogami e Villibor que relaciona a penetração com a contração diametral, é possível observar a classificação obtida para as amostras. De início, observa-se que o solo natural classificou-se como laterítico, sendo solo arenoso laterítico (LA') para o solo base, e diante as adições de teores de bentonita, obteve-se classificações diferentes, sendo solo arenoso e argiloso laterítico (LA'-LG') para o solo com adição de 2% de bentonita, e solo argiloso laterítico (LG') para as adições de 4% e 6%. Nota-se que os valores de contração e penetração tiveram aumento conforme a adição da bentonita, tal fato é demonstrado na Figura 30.

Figura 30 – Gráfico comparativo Contração e Penetração



Fonte: Autoria própria (2025).

É possível observar o aumento adjunto das duas características, isso se dá pela adição da argila bentonita, conforme aumenta o nível de teor adicionado ao solo muda sua característica para um solo plástico, aumentando sua coesão, o que explica o aumento de contração e a diminuição da resistência de penetração.

A avaliação de desempenho durante a etapa desidratação e reabsorção esta descrito na Tabela 10.

Tabela 10 – Descrição do comportamento das amostras na execução do ensaio do método expedito das pastilhas

Etapa	Solo			
	Amostra	Amostra + 2%	Amostra + 4%	Amostra + 6%
Comportamento durante o processo de amolgamento da amostra	Iniciamente apresentou um comportamento coesivo até o instante final	Iniciamente apresentou um comportamento coesivo até o instante final	Iniciamente apresentou um comportamento coesivo até o instante final	Iniciamente apresentou um comportamento coesivo até o instante final
Comportamento durante moldagem das pastilhas	Fácil moldagem, mas leve dificuldade com o rasamento devido a leve coesão	Fácil moldagem, mas leve dificuldade com o rasamento devido a leve coesão	Fácil moldagem, mas leve dificuldade com o rasamento devido a leve coesão	Fácil moldagem, mas leve dificuldade com o rasamento devido a leve coesão

Comportamento apresentado aós a desidratação da pastilha	Leves contrações com fissuras superficiais distribuídas sob seu corpo	Contração com leves fissuras superficiais distribuídas sob seu corpo	Apresentou uma grande contração com leves fissuras superficiais	Apresentou uma grande contração com leves fissuras superficiais
Comportamento após a reabsorção de água	Apresentou expansão de seu corpo com leves fissuras nas extremidades da pastilha	Apresentou expansão de seu corpo com leves fissuras nas extremidades da pastilha	Apresentou expansão com fissuras localizadas e com um pequeno filme de água superficial	Apresentou expansão com fissuras localizadas e com um pequeno filme de água superficial
Registro fotográfico após a desidratação				
Registro fotográfico após a reabsorção de água				

Fonte: Autoria própria (2025).

5.3 Permeabilidade à carga variável

Os resultados das aferições do ensaio de permeabilidade serão apresentados a decorrer da Tabela 11 a 14 referente aos CPs moldados no teor de umidade ótimo (W_{ot}) apresentando as condições de ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade (k) das amostras.

Tabela 11 – Condições e resultados da amostra em condição natural (I00)

CP	W_{mold}	$W_{mold} - W_{ot}$	GC (%)	e	Sr (%)	k (cm/s)
1	19,6	1,4	0,7	0,8	0,5	4,5E-08
2	19,2	1,0	0,7	0,7	0,5	4,8E-08
3	18,9	0,7	0,6	0,8	0,4	5,0E-06
4	20,0	1,8	0,7	0,8	0,5	5,6E-08
5	19,6	1,4	0,8	0,7	0,5	4,5E-08
6	19,7	1,5	0,7	0,7	0,5	5,1E-08
Média						8,8E-07

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 12 – Condições e resultados da amostra com 2% de bentonita (I02)

CP	W_{mold}	$W_{mold} - W_{ot}$	GC (%)	e	Sr (%)	k (cm/s)
1	21,3	-0,3	1,0	0,6	0,7	1,1E-07
2	22,6	1,0	1,1	0,5	0,9	3,0E-07
3	22,4	0,8	1,0	0,6	0,8	1,3E-07
4	20,4	-1,2	0,9	0,5	0,7	1,1E-07
5	22,0	0,4	1,0	0,5	0,8	9,8E-08
6	22,0	0,4	1,0	0,5	0,8	5,1E-08
Média						1,3E-07

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 13 - Condições e resultados da amostra com 4% de bentonita (I04)

CP	W_{mold}	$W_{mold} - W_{ot}$	GC (%)	E	Sr (%)	k (cm/s)
1	21,3	-0,3	1,0	0,6	0,7	2,2E-09
2	22,6	1,0	1,1	0,5	0,9	2,0E-09
3	22,4	0,8	1,0	0,6	0,8	1,7E-08
4	20,4	-1,2	0,9	0,5	0,7	4,9E-09
5	22,0	0,4	1,0	0,5	0,8	4,0E-08
6	22,0	0,4	1,0	0,5	0,8	4,6E-08
Média						1,9E-08

Fonte: Autoria própria (2025).

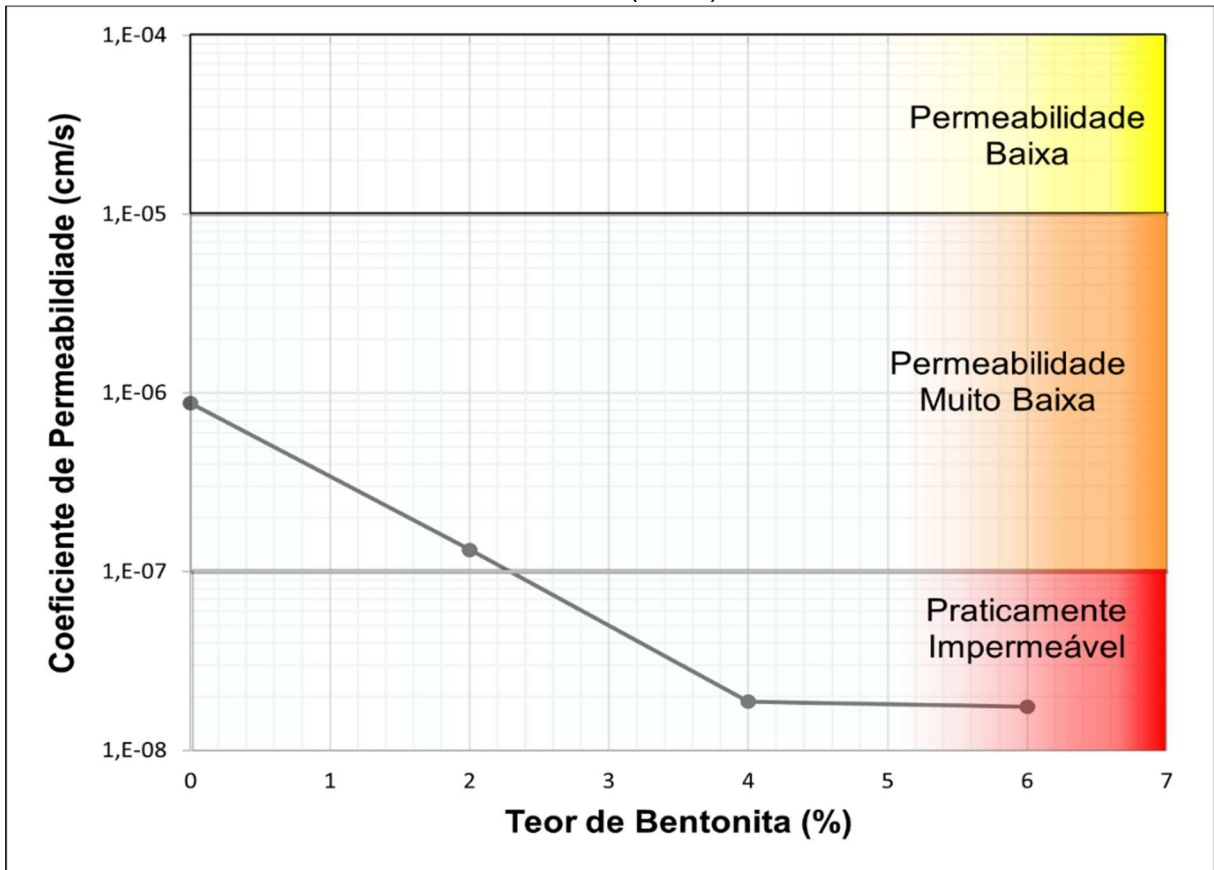
Tabela 14 – Condições e resultados da amostra com 6% de bentonita (I06)

CP	W_{mold}	$W_{mold} - W_{ot}$	GC (%)	e	Sr (%)	k (cm/s)
1	23,9	2,3	1,2	0,5	1,0	9,5E-09
2	22,0	0,4	1,1	0,5	0,9	5,8E-09
3	23,4	1,8	1,1	0,5	0,9	4,1E-09
4	22,8	1,2	1,1	0,5	0,9	5,5E-09
5	22,5	0,9	1,1	0,5	0,9	2,4E-08
6	22,9	1,3	1,1	0,5	0,9	5,6E-08
Média						1,8E-08

Fonte: Autoria própria (2025).

Com os resultados obtidos a partir das determinações das médias de k de cada amostra, molda-se uma representação gráfica que demonstra a alteração no coeficiente de permeabilidade conforme adiciona-se a argila bentonita, conforme apresentado na Figura 31.

Figura 31 – Representação da permeabilidade em função do teor de bentonita, juntamente com a classificação de grau de permeabilidade de acordo com Lemen e Whitman (1969)

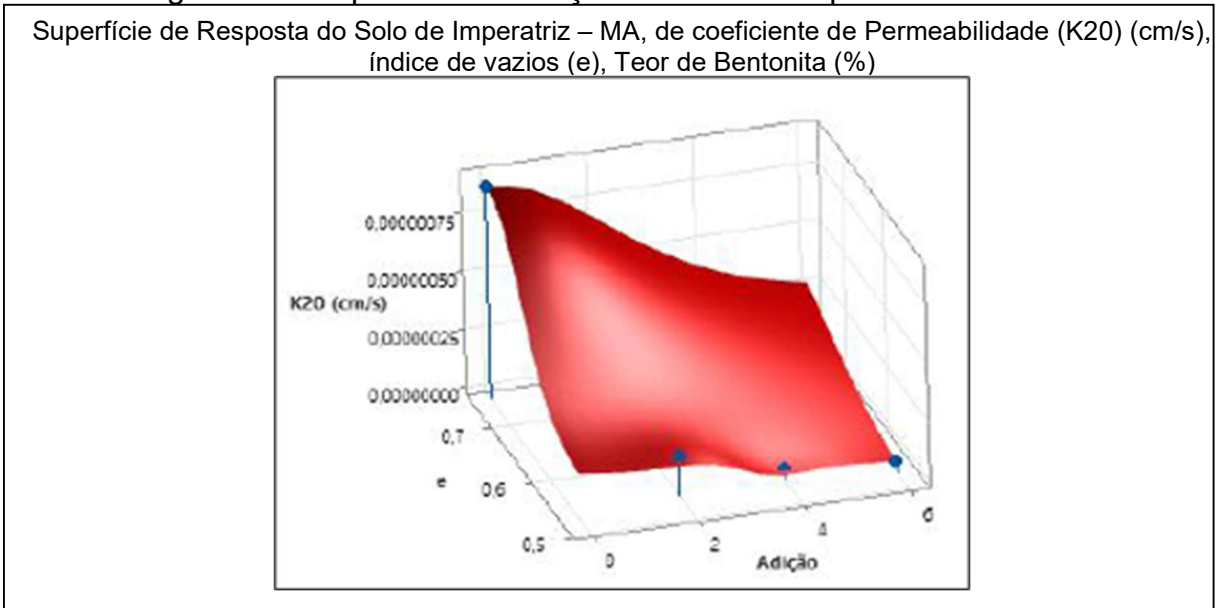


Fonte: Autoria própria (2025).

Observa-se que a partir da classificação de Lemen e Whitman, o solo natural possui uma permeabilidade tida como muito baixa, isso se deve a sua alta porcentagem de argila na amostra. Com a adição de 2% de bentonita, a amostra apresentou uma redução expressiva, porém ainda seguiu com a mesma classificação de permeabilidade muito baixa. À medida que a presença de argila bentonita aumenta, o coeficiente de permeabilidade tende a baixar, chegando a classificação de praticamente impermeável com os teores de 4% e 6% de bentonita. Apesar da expressiva redução, a amostra não chegou ao limite 10^{-8} cm/s predefinido pela NBR 13896 (ABNT, 1997) para uso em implantação de camada de base de aterro sanitário.

Associando o percentual de adição de bentonita com a variação do índice de vazios e o coeficiente de permeabilidade, moldou-se uma representação de superfície que destaca a alteração obtida, conforme apresentado na Figura 32.

Figura 32 – Superfície das adições de bentonita para as amostras



É possível observar a proporcionalidade e o efeito do índice de vazios na permeabilidade, conforme tem-se a redução do índice de vazios, o coeficiente de permeabilidade também sofre diminuição, isso se deve a presença da argila bentonita preenchendo os vazios e ao ser hidratada sofre expansão (devido a sua característica mineralógica), diminuindo os vazios.

Diante os resultados, observa-se que o coeficiente de permeabilidade apresentou reduções conforme era esperado com as adições de teores de bentonita devido as características dos argilominerais presentes, chegando a resultados de 6, 46, 48 vezes menores comparada a amostra natural.

5.4 Correlação dos resultados

A compreensão do comportamento geotécnico e hidráulico de um solo, especialmente para fins de barreiras impermeabilizantes, não se restringe apenas aos resultados diretos dos ensaios de permeabilidade. Uma análise que correlaciona e interpreta os dados obtidos de diferentes ensaios de caracterização e classificação, permite uma visão mais completa dos mecanismos envolvidos na interação solo-bentonita e na variação da condutividade hidráulica, conforme apresentado na Tabela 15.

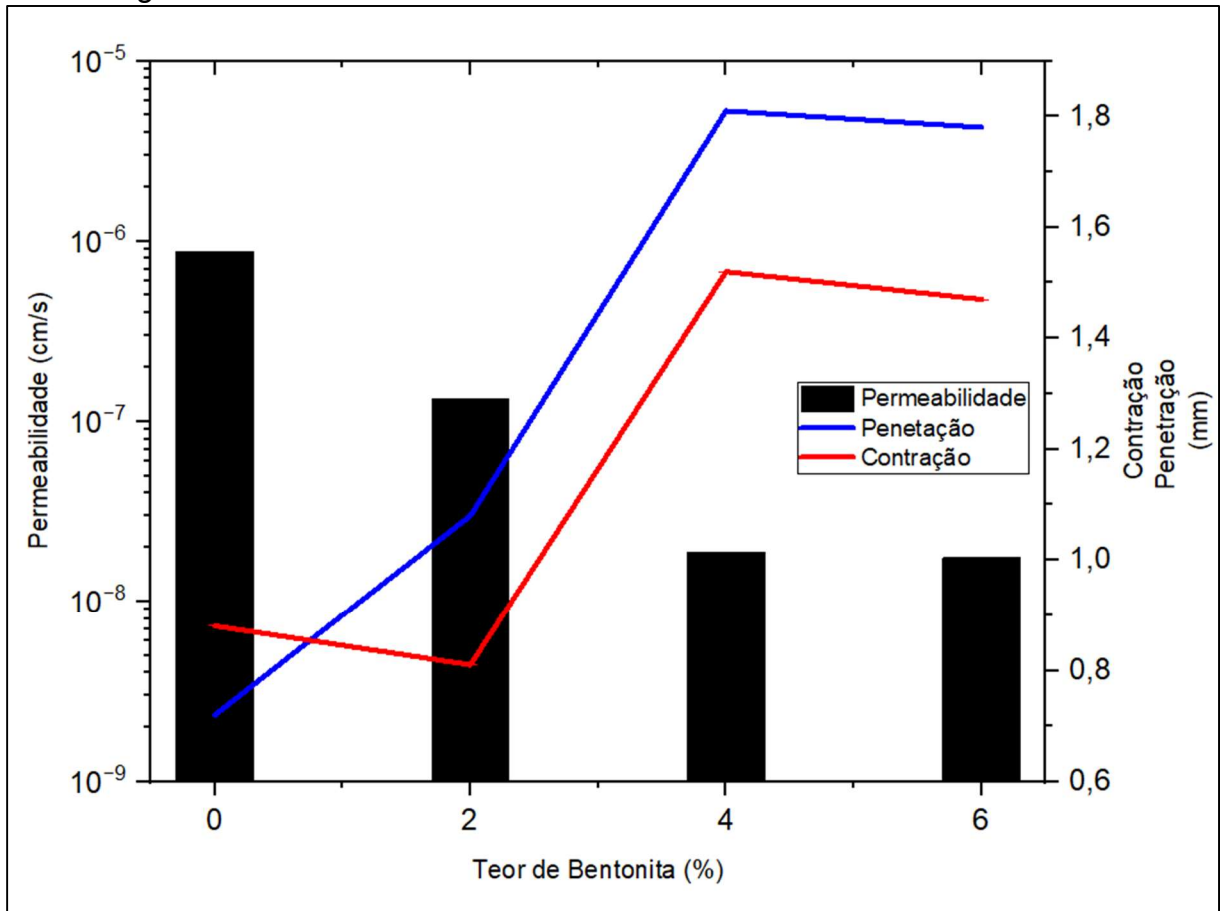
Tabela 15 – Análise dos resultados e correlações

Ensaio / Característica	(Solo Natural)	(Solo + Bentonita)	Correlação / Implicação Indireta para Permeabilidade
Granulometria	Alto teor de finos (fração argila), variações com defloculante.	Aumento do teor de argila total devido à adição de bentonita.	Maior teor de finos (argila) = menor permeabilidade potencial.
Limites de Consistência (LL)	LL médio de 32,63%.	LL médio de 33,8% (2%) 39,45% (4%) e 40,34% (6%).	Aumento do LL indica maior capacidade de absorção de água, sugerindo maior expansão e menor permeabilidade.
Classificação SUCS	Silte de baixa compressibilidade (ML).	Argila de baixa compressibilidade (CL).	Transição para CL indica maior teor e atividade de argila, correlacionando-se com menor permeabilidade.
Mineralogia (DRX)	Caulinita, Ilita, Goetita.	Caulinita, Ilita, Goetita, Montmorilonita, Lepidolita (na bentonita).	Presença de Montmorilonita (na bentonita) explica a expansibilidade e o potencial de redução permeabilidade.
Adsorção de Azul de Metileno (AM)	Baixa atividade (IA Skempton), "Ativos" (Fabbri).	Aumento de VA, VB, Acb, CTC, SE. Classificação "Ativos" (Fabbri), "Pouca Ativas" (Lautrin).	Maior atividade e superfície específica = maior capacidade de adsorção de água e potencial de preenchimento de poros, resultando em menor permeabilidade.
Método das Pastilhas (MCT)	Laterítico Arenoso (LA').	Laterítico Arenoso e Argiloso (LA'-LG'), Laterítico Argiloso (LG'). Contração e expansão nas pastilhas.	Transição para grupos mais argilosos/lateríticos com maior expansão indica um solo mais sensível à água, com potencial de preenchimento de vazios e menor permeabilidade.
Compactação Proctor Normal	Umidade ótima 18,22%, Peso Específico Seco Máx. 1,75 kN/m ³ .	Umidade ótima 20,33-21,59-21,60%, Peso Específico Seco Máx. 1,62-1,60-1,61 kN/m ³ .	Aumento da umidade ótima e leve redução do peso específico máximo indicam maior quantidade de água necessária para compactação, e o preenchimento de vazios pela expansão da bentonita, favorecendo a baixa permeabilidade.
Índice de Vazios (e)	Índice de Vazios médio de 0,76.	Redução do índice de vazios para 0,55-0,56.	Redução do índice de vazios diretamente correlacionada com a redução da permeabilidade, pois há menos espaço para o fluxo de água.
Permeabilidade (k)	8,8×10 ⁻⁷ cm/s (Muito Baixa).	1,3×10 ⁻⁷ cm/s (2%) (Muito Baixa) 1,9× 10 ⁻⁸ cm/s (4%), 1,8×10 ⁻⁸ cm/s (6%) (Praticamente Impermeável).	A redução direta do k é o objetivo final, confirmando que todas as alterações mineralógicas e físico-químicas contribuíram para a impermeabilização.

Fonte: Autoria própria (2025).

Vale destacar a correlação inversa entre a permeabilidade e os indicadores de contração e penetração do ensaio MCT, conforme a Figura 33. A medida que a permeabilidade diminui com a presença da argila bentonítica, a amostra se tornava mais plástica (comprovado nos limites de consistência, item 5.1.2) tornando-se mais penetrável e com reações de contração.

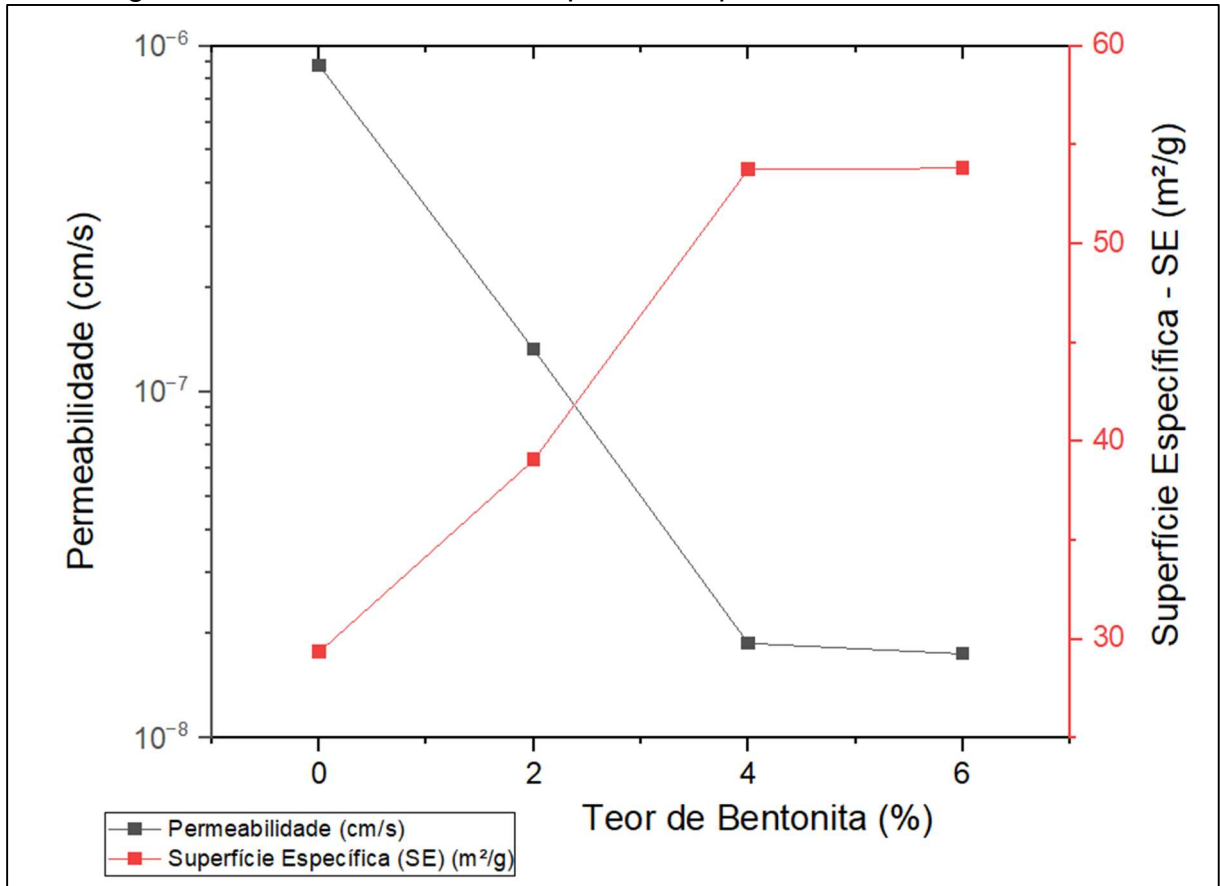
Figura 33 – Resultados do MCT x Permeabilidade x Teor de Bentonita



Fonte: Autoria própria (2025).

Outro destaque, está na relação entre a permeabilidade e a Superfície Específica – SE obtida através do ensaio de adsorção de azul metileno. A presença da bentonita (rica em montmorilonita) na amostra aumenta a SE, o que beneficia o objetivo de redução da permeabilidade, pois aumenta-se a área disponível do solo para a adsorção de água, aumentando a tortuosidade dos poros, mecanismos estes são fundamentais para a redução da permeabilidade. A Figura 34 ilustra a relação inversa entre a SE e a permeabilidade.

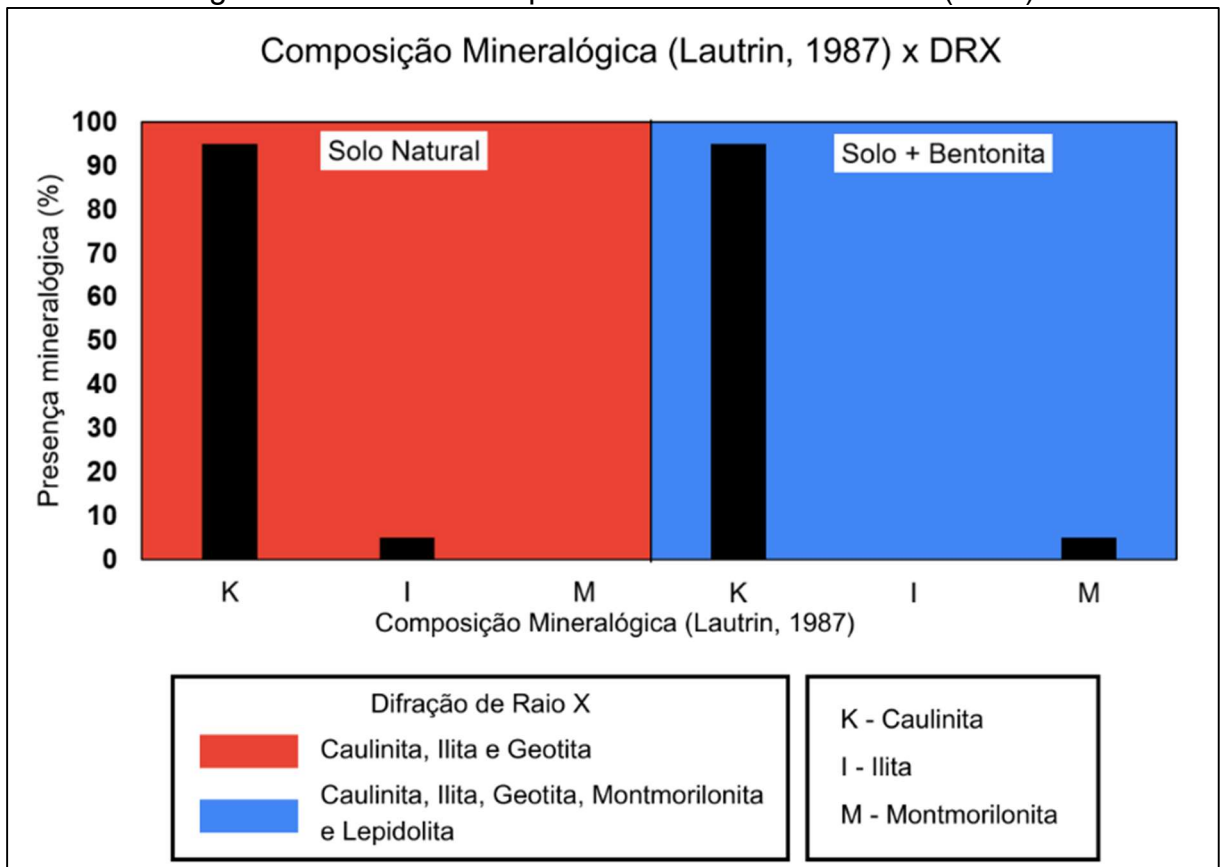
Figura 34 – Permeabilidade x Superfície Específica x Teor de Bentonita



Fonte: Autoria própria (2025).

Além disso, toma-se como forma explicativa das mudanças no comportamento geotécnico, a composição mineralógica do solo natural com adição de bentonita. A Figura 35 demonstra a correlação entre a identificação dos argilominerais por Difração de Raios X e a composição mineralógica de Lautrin (1987) estimada pelo método de adsorção de Azul de Metileno. Observa-se que para o solo natural (representado pela cor vermelha), a análise de DRX identificou a presença de caulinita, ilita e geotita, Lautrin predomina a presença de 95% de caulinita (K) e 5% de ilita (I). Por outro lado, a adição de bentonita ao solo (representado pela cor azul) resultou na identificação por DRX de caulinita, ilita, geotita, montmorilonita e lepidolita. Essa mudança mineralógica reflete no gráfico de classificação de Lautrin, que identifica a elevação percentual da montmorilonita (M), tal argilomineral possui a característica que reflete as mudanças de comportamento do solo, tornando-o mais ativo e expansivo.

Figura 35 – Análise comparativa entre DRX e Lautrin (1987)



Fonte: Autoria própria (2025).

Em suma, a análise das correlações dos ensaios realizados demonstrou que a mineralogia do solo e a adição de bentonita não apenas alteraram as propriedades físicas e de plasticidade, mas foram o mecanismo fundamental que culminou na redução da permeabilidade, validando o uso da bentonita como aditivo para uso de solos como barreiras impermeabilizantes em aterros sanitários em Imperatriz – MA.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como cerne a análise mineralógica da adição de bentonita como barreira impermeabilizante no solo da área de destinação final em Imperatriz – MA. Os objetivos específicos incluíram analisar a redução da permeabilidade do solo com a adição de bentonita, caracterizar os minerais da bentonita e do solo local usando difração de raios X (DRX), verificar a atividade coloidal através da adsorção de azul de metileno e dos limites de Atterberg, e classificar os solos usando a metodologia Miniatura Compactada Tropical (MCT).

A pesquisa revelou que a adição de bentonita aumentou significativamente o limite de liquidez (LL) e o índice de plasticidade (IP) do solo. Isso indica uma maior capacidade de absorção de água e aumento dos limites de consistência, o que era esperado devido à natureza expansiva da bentonita. O Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) classificou o solo natural como um silte de baixa compressibilidade (ML), que se tornou uma argila de baixa compressibilidade (CL) com a adição de bentonita. A análise de difração de raios-X identificou caulinita, illita e goetita no solo natural. Com a adição de bentonita, a montmorilonita e a lepidolita também foram identificadas. A presença de montmorilonita, um argilomineral altamente expansivo, explica as mudanças observadas no comportamento do solo e o aumento de sua atividade.

O ensaio de adsorção de azul de metileno mostrou um aumento na atividade coloidal e na superfície específica (SE) com o teor de bentonita, confirmando ainda mais a influência da bentonita nas propriedades do solo. A classificação MCT indicou que o solo natural era um solo arenoso laterítico (LA'), que evoluiu para um solo arenoso e argiloso laterítico (LA'-LG') e, em seguida, para um solo argiloso laterítico (LG') com o aumento das porcentagens de bentonita. Essa mudança corresponde a um aumento nos valores de contração e penetração, sugerindo que o solo se torna mais plástico com a adição de bentonita.

Crucialmente, os testes de permeabilidade demonstraram uma redução significativa na condutividade hidráulica do solo com a adição de bentonita. O solo natural apresentou uma permeabilidade classificada como muito baixa, mas com 4% e 6% de bentonita, conforme a classificação utilizada o solo é tido como praticamente impermeável. O coeficiente de permeabilidade foi reduzido de 6 a 48 vezes em comparação com o solo natural. Essa redução está diretamente correlacionada com

a diminuição do índice de vazios e o aumento da superfície específica, ambos influenciados pela natureza expansiva da bentonita. Apesar do coeficiente de permeabilidade não apresentar o limite predefinido pela NBR 13896, a redução da permeabilidade mostrou resultados positivos para o objetivo da pesquisa.

Portanto, a adição de bentonita é uma opção para reduzir a permeabilidade dos solos. Entretanto, faz-se necessário avaliar tecnicamente e economicamente a disponibilidade e localização das jazidas de argila para uso.

6.1 Recomendações

Os ensaios realizados nesta pesquisa são de âmbito laboratorial, porém há exceções que podem ser recomendadas para campo devido a sua agilidade, resultados proveitosos e por exigirem equipamentos de simples arranjo.

Ensaio de adsorção de azul metileno pelo método de Fabbri usando a classificação de Lautrin se mostrou proveitoso na coleta e interpretação dos resultados. Forneceu dados valiosos que foram confirmados com a análise mineralógica com a Difração de Raio X. Recomenda-se devido a sua agilidade e facilidade para a realização.

Além disso, a classificação MCT pelo método das pastilhas foi outro ensaio que mostrou facilidade na sua confecção e mostrou bons resultados que contextualizou a mudança de comportamento das amostras desta pesquisa.

Além das recomendações de ensaios para uso em campo, recomenda-se para futuras pesquisas o estudo sobre o custo de implantação de um projeto com o uso de argila bentonita como aditivo comparando com outros métodos para construção de barreira impermeabilizante em aterros sanitários.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Sumário Mineral Brasileiro de 2018: Bentonita**. Disponível em : < <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2018-> >. Acesso em Janeiro de 2025.
- ALBERS, A. P. F.; MELCHIADES, F. G.; MACHADO, R.; BALDO, J. B.; BOSCHI, A. O. Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X. **Cerâmica** . 2002, vol. 48, n. 305, 2002.
- ALONSO, T. P. **Condutividade hidráulica de solos compactados em ensaios com permeômetros de parede flexível**. Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2005.113p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D2488-17e1: Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedures)**. West Conshohocken, PA, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D3282-24: Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes**. West Conshohocken, PA, 2024.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D5084-24: Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter**. West Conshohocken, PA, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. São Paulo: ABRELPE. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022.pdf>>. Acesso em: dez.2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS E EFLUENTES (ABETRE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil: 2020**. Disponível em: <https://sinir.gov.br/mapas/abetre/>. Acesso em: dez de 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14545: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável**. Rio e Janeiro, RJ, 2021.16p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, RJ, 2016. 12p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10004: Resíduos Sólidos: Classificação**. Rio de Janeiro, pp. 77, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT.**NBR 13600: Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, RJ, 2022.2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT.**NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação.** Rio de Janeiro, p.12. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT.**NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, RJ, 2017.5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT.**NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, RJ, 2016.3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT.**NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro, RJ, 2018.12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT.**NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, RJ, 2016.9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT.**NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros de resíduos sólidos urbanos.** Rio de Janeiro, RJ, 1992. 7p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT.**NBR 9252: Solo - Determinação do grau de acidez.** Rio de Janeiro, RJ, 2016. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE (ABREMA). **Brasil destinou 33,3 milhões de toneladas de lixo de forma inadequada em 2022.** São Paulo: ABREMA. Disponível em : < <https://www.abrema.org.br/2024/07/18/brasil-destinou-333-milhoes-de-toneladas-de-lixo-de-forma-inadequada-em-2022/> >. Acesso em dez.2024.

BORBA, W. F.; SILVA, J. S. S.; KEMERICH, P. D. C.; SOUZA, E. E. B.; FERNANDES, G. D. Permeabilidade do solo em área de aterro sanitário. **Caderno de Geografia**, v.30, n.61, p. 272 – 285, 2020.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental.** 1a Reimp. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

BRAJA M. DAS. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2007.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). **Manual de Pavimentação.** 2. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. **Diário Oficial da União:** seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB). **DOCUMENTO EM REVISÃO SUBMETIDO À APRECIÇÃO DOS CONSELHOS NACIONAIS DE SAÚDE, RECURSOS HÍDRICOS E MEIO AMBIENTE**. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. Diretora de Financiamentos de Projetos. Diretora de Repasses a Projetos. Brasília, 2019, pp. 18- 239.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9ed. Rio de Janeiro – RJ. Grupo Gen-LTC, 2016.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000.

CARVALHO, J. C.; GITIRANA JR., G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. 759 p. ISBN: 9788567950037.

CONDER. COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO URBANO DO ESTADO DA BAHIA (CONDER). **Resíduos sólidos e sua destinação final**. In: Em Pauta, ano I, n.1. Salvador: CONDER/DIURB/Centro de Estudos e Referência em Resíduos Sólidos, 2011.

DANIEL, D. E.; BENSON, C. H. Water content-density criteria for compacted soil liners. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 116, n. 12, p. 1811-1823, 1990.

DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Principles of geotechnical engineering**. 9. ed. Boston, MA: Cengage Learning, 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. rev. e atual. Brasília – DF: Embrapa, 2017.

FABBRI, Glauco Tulio Pessa. **Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno**. 1994. Tese de doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos – SP, 157p, 1994.

FERREIRA, Heber Sivini. **Otimização do processo de organofilização de Bentonitas Visando seu Uso em Fluidos de Perfuração não Aquosos**. 2009. 111p. Campina Grande – PB. Tese (Doutorado em Engenharia de Processo). Universidade Federal de Campina Grande, 2009.

FERREIRA, J. A.; SARTOR, M. L. Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos: estudo de caso da cidade de Cascavel-PR. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 4, p. 699-710, 2015.

FRANCESCHET, Meire. **Estudo dos solos utilizados em camadas de base e cobertura em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos de Santa Catarina**. 2006. 148p. Florianópolis, SC. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

GARNICA, Alfredo Ismael Curbelo; CURBELO, Fabíola Dias da Silva; MAGALHÃES, Renata Rodrigues; DE SOUSA, Roxana Pereira Fernandes. Efeitos de surfactantes na organofilização de argilas bentoníticas para uso em fluidos de perfuração de base microemulsionada. **HOLOS**, v. 4, p. 89–105, 2018. DOI: 10.15628/holos.2018.7089. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/7089>. Acesso em: 05 jan. 2025.

GUIMARÃES, Raiza Michele; BENATTI, Julio César Beltrame; FERREIRA, Raul Tadeu Lobato. Análise físico-química e mineralógica de um solo de Sinop-MT, puro e com adição de bentonita. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 4, p. 21974-21987, abr. 2020.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. Vol. 2. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora SA, 2009.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pedologia por Estado**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

KOERNER, R. M. **Designing with Geosynthetics**. 6. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2012.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**, New York: J. Wile, 1969.

LANZA, Vera Christina Vaz; MACHADO, Rosângela Moreira Gurgel; TORQUETTI, Zuleica Stela Chiacchia; FERNANDES, Patrícia Rocha Maciel; LEIS, Alexandre Guimarães; TEIXEIRA, Cornélio Zampa. **Caderno técnico de áreas degradadas por resíduos sólidos Urbanos**. Belo Horizonte-MG: Fundação Estadual de Meio Ambiente, 2010. 36 p.

LAUTRIN, D. **Une Procédure d' Identification des Argiles**. **Bulletin de Liaison des Laboratoires et Chaussées**. N° 152, p. 75-84. França, 1987.

LAUTRIN, D. Utilisation pratique des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène dans les projets de génie civil. **Bulletin Liaison Laboratoires Ponts Chaussées**, [s. l.], n. 160, p. 29-41. 1989.

LEME, Mariane Alves de Godoy. **Caracterização de solo utilizado no sistema de barreira impermeabilizante de base de uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

LOCASTRO, J. C; ANGELIS, B. L. D. Barreiras de impermeabilização: configurações aplicadas em aterros sanitários. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria**, v. 20, n. 1, p. 200-210, 2016.

MELO, M. C.; CARIBÉ, R. M.; MONTEIRO, V. E. D.; FARIAS, R. M. S. Deformação Vertical dos Resíduos Sólidos Urbanos em uma Célula Experimental em Função da Composição Gravimétrica e Volumétrica dos Materiais. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v.21, n.2, pp. 450 – 460, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160002.0042>. Acesso em: nov de 2024.

MONTEIRO, M. J. **Sistema logístico reverso para destinação final adequada de resíduos sólidos urbanos, sob a visão do pensamento sistêmico**, Publicação T.DD – 007/2017, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 230p, 2017.

MOTTA, A. C. V. **Mineralogia de solos: aspectos práticos e teóricos**. Curitiba: UFPR, 2017.

NASCIMENTO, N. V. do; LIMA, F. R. G.; PORTELA, F. F.; SOUSA, J. L. C. de; CORREIA JUNIOR, C. A. Gestão de resíduos sólidos no Nordeste brasileiro urbano. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, [S. l.], v. 10, n. 11, p.12, 2021.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Identificação expedita dos grupos da classificação MCT para solos tropicais. **Anais do X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações**. Foz do Iguaçu, PR. V4, pp 1293-1300, 1994.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. **Anais do SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA**, 1., 1981, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, v. 1, p. 30-41, 1981.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. Editora Villibor, 2009. 292 p.

NORMES FRANÇAISES ET EUROPÉENNES – NF: 94-068. **Soils: investigation and testing. Measuring of the methylene blue adsorption capacity of a rocky soil. Determination of the methylene blue of a soil by means of the stain test**. French, 1998, 8p.

PEJON, O. P. **Mapeamento Geotécnico Regional da Folha de Piracicaba – SP (escala 1:100.000)**: Estudo de Aspectos Metodológicos, de Caracterização e de Apresentação de Atributos. Tese de Doutorado. São Carlos. pp.2v. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1992.

PIEIDADE JUNIOR, Célio Roberto Campos. **Análise da potencialidade de alguns solos não lateríticos para utilização em barreiras impermeáveis**. 2003. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. doi:10.11606/D.18.2003.tde-07052008-150323. Acesso em: 2025-01-24.

PREFEITURA DE IMPERATRIZ. **Construção do aterro sanitário de Imperatriz tem início nesta terça-feira (28)**. Imperatriz, 2022b. Disponível em: <https://imperatriz.ma.gov.br/noticias/meio-ambiente/construcao-do-aterro-sanitario-de-imperatriz-tem-inicio-nesta-terca-feira-28.html>. Acesso em: 16 jun. 2025.

PREFEITURA DE IMPERATRIZ. **EDITAL PARTE 6**. [S. D.]: Imperatriz, [s.d.]. Disponível em: https://sti.imperatriz.ma.gov.br/media/edicts/files/edict/EDITAL_PARTE_6.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.

PREFEITURA DE IMPERATRIZ. **Obras do aterro sanitário de Imperatriz avançam e alcançam 60% de conclusão.** Imperatriz, 2025. Disponível em: <https://imperatriz.ma.gov.br/noticias/obras-do-aterro-sanitario-de-imperatriz-avancam-e-alcancam-60-de-conclusao.html>. Acesso em: 16 jun. 2025.

PREFEITURA DE IMPERATRIZ. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólido (PMGIRS).** Imperatriz – MA, 2018.

PREFEITURA DE IMPERATRIZ. **Prefeitura anuncia mudanças no lixão de Imperatriz.** Imperatriz, 2022a. Disponível em: < <https://imperatriz.ma.gov.br/noticias/limpeza-urbana/parceria-entre-municipio-e-suzano-anuncia-mudancas-no-lixao-de-imperatriz.html> >. Acesso em 05 de jan. 2025.

REDE NACIONAL DE CAPACITAÇÃO E EXTENSÃO TECNOLÓGICA EM SANEAMENTO AMBIENTAL (RECESA). **Resíduos sólidos: projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários: guia em treinamento: nível 2.** Ministério das Cidades. Secretaria de Saneamento Ambiental. Belo Horizonte, 2008. 120p.

Romanini, A.; Bennati, J. C. B. **Correção da permeabilidade de um solo tropical com adição de bentonita.** 2015. Trabalho de conclusão de curso (Graduação e Engenharia Civil) – Universidade do Estado de Mato Grosso, Sinop, Mato Grosso, Brasil, 2015.

SAMPAIO, E. P. M. **Mineralogia do solo.** 2011. Departamento de Geociências da Universidade de Évora, 2011. 21 p. Disponível em: < <http://home.dgeo.uevora.pt/~ems/files/Anexo%20B-03.pdf> > . Acesso em: novembro de 2024.

SANTOS, Eliana Fernandes dos. **Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais.** 2006. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SEED, H. B.; CHAN, C. K. Structure and strength of compacted clay. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 85, n. SM5, p. 87-122, 1959.

SHACKELFORD, C. D. et al. Field performance of a compacted soil liner. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 126, n. 11, p. 1009-1017, 2000.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais.** 6a edição. Pearson. São Paulo, 2008.
SILVA, A. S.; RIBEIRO, L S.; PAIVA, W.; MELO, M. C.; MONTEIRO, V. E. D. Avaliação do potencial tóxico dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande – PB. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 4, pp. 840 – 851, 2015.

SILVA, Izabela de Oliveira; TAGLIAFERRO, Evandro Roberto; OLIVEIRA, Adauto José de. Gerenciamento dos resíduos sólidos domiciliares no município de Jales - SP e sua relação para com a política nacional de resíduos sólidos (PNRS). **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 1, p. 11475-11499, jan. 2021.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos**. Brasília, 2023. Disponível em: <www.snis.gov.br>. Acesso: em Janeiro de 2025.

SKEMPTON, A. W. The colloidal "activity" of clays. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3., 1953, Zurich. **Proceedings...** Zurich: [s.n.], 1953. v. 1, p. 57-61.

TONNESEN, Diego A.; BERTOLINO, Luiz Carlos; LUZ, Adão Benvindo; SILVA, Flávio Teixeira; TIMÓTEO, Dayse Mirella. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E BENEFICIAMENTO DAS BENTONITAS DA REGIÃO DE CUBATI E PEDRA LAVRADA - PB. **HOLOS**, [S. l.], v. 1, p. 2–14, 2012. DOI: 10.15628/holos.2012.821. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/821>. Acesso em: 12 jan. 2025.

UNITED STATES. EPA. ENVIRONMENTAL PROTECCION AGENCY. **Assessing And Remediating Low Permeability Geologic Materials Contaminated By Petroleum Hydrocarbons From Leaking Underground Storage Tanks: A Literature Review**. Washington, D.C., 2019. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ust/assessing-and-remediating-low-permeability-geologic-materials-contaminated-petroleum>>. Acesso em: nov de 2024.

ANEXOS

ANEXO A – AVALIAÇÃO DA ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO PELO MÉTODO DA MANCHA

A avaliação da capacidade de adsorção de azul de metileno foi realizada pelo método da mancha, conforme prescrito na norma Francesa NF P 94-068 e preconizado também pelas normativas brasileiras NBR 14949 (ABNT, 2017). O método baseia-se na adsorção de azul de metileno por partículas finas presentes no solo, geralmente sendo argiloso. A titulação é realizada pela adição progressiva de uma solução padrão de azul de metileno sobre uma suspensão do solo em estudo. A capacidade de adsorção é avaliada visualmente, a partir da formação de uma mancha azul persistente sobre o papel filtro.

Os materiais e equipamentos são visualizados na Figura 36, e descritos abaixo:

- Bureta com capacidade de 25 ml e graduação de 0,1 em 0,1 ml;
- Base para a bureta;
- Relógio com precisão de segundos;
- Baguete de vidro cilíndrico, com cerca de 8 mm de diâmetro e comprimento de 250 mm;
- Agitador magnético para soluções líquidas, com a opção de ajustar a quantidade de rotações;
- Béquer de 250 ml;
- Recipiente de vidro de 100 e 1000 ml;
- Papel filtro circular de diâmetro entre 120 e 150 mm, adequado para microcristais, com um teor de cinzas inferior a 0,01%, do tipo Reagen R-42 ou equivalente;
- Solução padrão aquosa de azul de metileno, contendo 1 g de sal anidro por litro da solução;
- Água destilada;

Figura 36 – Equipamentos para a realização do ensaio de azul de metileno



Fonte: Autoria própria (2025).

Segundo a ABNT NBR 14949 (2017), estabelece como método para a realização do ensaio de adsorção de azul de metileno através da determinação de uma solução padrão de corante, onde avalia-se o grau colorimétrico que amostra possui com o método da mancha.

- 1) Pesar 1 g de solo da fração passante na peneira de 0,074 mm e, acondicioná-lo em um béquer de 250 ml;
- 2) Colocar 100 g de água destilada no béquer;
- 3) Posicionar a solução água + solo presente no Becker, no agitador magnético e ligá-lo;
- 4) Verificar a temperatura da água destilada;
- 5) Introduzir no Becker que contém a suspensão, com auxílio de uma bureta graduada 1,0 ml da solução titulada de azul de metileno e acionar o cronômetro;
- 6) Agitar a suspensão por um período de 1 minuto;
- 7) Após o intervalo sem desligar o agitador, introduzir o conta-gotas e capturar uma gota da mistura e pingá-la um uma folha de papel filtro quantitativo;
- 8) Deve-se observar a formação da mancha durante da difusão da gota com o papel-filtro, atentando-se o surgimento de uma aureola azulada ao redor da mancha circular que contém as partículas de solo (núcleo da mancha), apresentando uma

borda de tonalidade opaca, caracterizada pela parte líquida da mistura que foi filtrada papel-filtro;

- Se houver o aparecimento da aura azulada ou esverdeada ao redor da borda que rodeia o núcleo escuro, deve-se esperar por mais 3 minutos e repetir as etapas 7 e 8.
- Divergente a isso, caso não haja o aparecimento da aura ou o desaparecimento de aura após 3 minutos, deve-se repetir a operação a partir da etapa 5, até a mancha de se manter constante após 3 minutos;

9) Após determinada o ponto de saturação da solução através da análise colorimétrica, afere-se o volume despejado de azul de metileno (V), que foi responsável para o ponto de viragem no teste da mancha;

A execução do ensaio de Adsorção do Azul de Metileno conforme a norma francesa é estruturada de maneira similar à norma brasileira, conforme mencionado anteriormente, apresentando algumas diferenças. Especificamente, a concentração do corante de Azul de Metileno indicada pela NF P 94 – 068 é de 10 g/L para todos os tipos de solo, e o diâmetro máximo dos grãos não deve exceder 5 mm.

Os valores obtidos permitem estimar a presença e atividade de frações finas, como argilas expansivas e matéria orgânica, que influenciam diretamente na capacidade de adsorção e propriedades de troca iônica do solo.

Para a apresentação dos resultados, tanto a NBR 14949 e a NF P 94-068 expõem que sejam apresentados em ml da solução consumida pela quantidade em grama da fração fina do material analisado e conforme Chen et al. (1974) apud Pejon (1992) pode ser apresentada pela Equação 6.

$$VB = \frac{V \times C \times 100}{M} \quad (6)$$

Onde:

VB: Volume de Azul consumido para 100 g de solo, que é a Capacidade de Troca Catiônica – CTC, sendo dado em meq/100g;

V: Volume da Solução de Azul de Metileno de Azul de Metileno gasta (ml);

C: Concentração de Azul de metileno empregada (1g/1000ml);

M: Massa do solo seco utilizada (g).

Para determinação da Superfície Específica – SE, faz-se necessário obter a determinação recoberta por 1 ml de azul de metileno na concentração utilizada e conforme Pejon (1992) apud. Fabbri (1994) é apresentada conforme a Equação 7.

$$S = \frac{A \times N \times m}{Mam \times 1000} \quad (7)$$

Onde:

S: Superfície Adsorvida pelo Azul de metileno (m²/ml);

A: Área da face da molécula de azul de metileno (130 Å²);

N: Número de Avogadro; m: massa de Azul de Metileno seca utilizada na preparação da solução (g);

Mam: Massa Molecular do Azul de metileno na forma anidra (319,9);

Resultando na seguinte expressão:

$$S = \frac{130 \times 10^{-2} \times 6,02 \times 10^{23} \times 1}{319,9 \times 1000} = 2,44 \text{ m}^2/\text{ml}$$

Desse modo, é possível determinar SE conforme a Equação 8:

$$SE = \frac{2,44 \times V}{M} \quad (8)$$

Onde:

SE: Superfície específica, (m²/g);

V: Volume de azul utilizado durante o ensaio para saturar o solo, (ml);

M: Massa de solo seco utilizada ao ensaio, (g);

Outra determinação possível é a determinação do volume de azul metileno consumido por 1 g de amostra de solo integral, conforme Fabbri (1994), onde é apresentado em termos de VA (Equação 9):

$$VA = V \times \frac{P200}{100} \times \left(1 \times \frac{w}{100}\right) \quad (9)$$

Onde:

VA: volume de azul de metileno consumido por 1 g de amostra de solo integral;

V: volume da solução de azul de metileno adicionado à suspensão durante o ensaio (ml);

P200: porcentagem de solo passante na # 0,074 mm (%);

W: teor de umidade da amostra de solo (%).

Para determinação do grau de atividade do solo, é calculado o Coeficiente de Atividade (CA), resultado a partir da correlação entre o volume de eazul consumido pela suspensão, em gramas, por uma grama de solo (VA) e o coeficiente de fração que contem diâmetro inferior a 0,005 mm (PF) (FABBRI, 1994), conforme a Equação 10:

$$CA = \frac{VA \times 100}{PF} \quad (10)$$

Onde:

CA: Coeficiente de atividade do solo para a porção menor que 0,005 mm de diâmetro;

VA: Volume de azul de metileno consumido por 1 grama de solo (ml)

PF: Porcentagem de solo que contém granulometria < 0,005 mm.

ANEXO B – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO MINIATURA COMPACTADA TROPICAL - MCT

Para a classificação MCT da amostra foi adotado o sistema do método das pastilha proposto por Nogami e Villibor (1994). O ensaio baseia-se na observação do comportamento de pequenas pastilhas de solo compactado submetidas a ciclos de umedecimento e secagem, avaliando sua contração e penetração. Com isso, avalia-se os coeficientes c' e e' .

O coeficiente c' indica a deformação relacionada à argilosidade do solo, obtido pelo ensaio mini-MCV, que compacta amostras para alcançar a máxima densidade usando golpes com soquete.

O coeficiente e' é derivado do coeficiente d' , definido como o módulo de inclinação da parte reta do ramo seco na curva de compactação, correspondente a 12 golpes no ensaio mini-MCV. Ele se relaciona ao percentual de solo perdido por imersão, calculado pela Equação 11.

$$e' = \sqrt[3]{\left(\frac{P_i}{100} + \frac{20}{d'}\right)} \quad (11)$$

Onde:

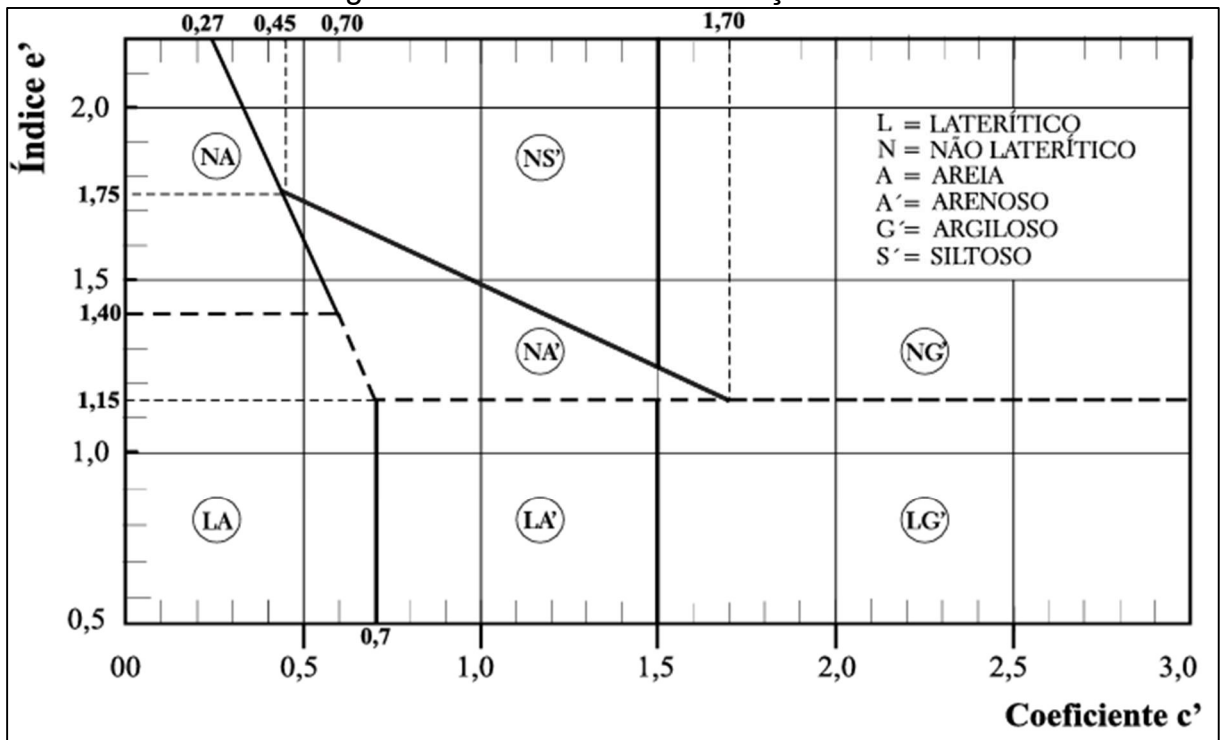
E' = Índice de laterização

P_i = Perca de peso por imersão, (%);

d' = Grau do ramo seco na curva de compactação;

Após obtidos os resultados do coeficientes c' e e' , classifica-se o solo utilizando o ábaco descrito na Figura 37, norteando qual grupo o solo pertence.

Figura 37 - Gráfico de classificação MCT



Fonte: Nogami e Villibor (2009).

A execução do ensaio MCT impõe uma dificuldade, onde é necessário grande quantidade de ensaios. Devido a isso, desenvolveram-se métodos aplicados em pequenas pastilhas, definido como Método Expedito das Pastilhas que possibilita obter a mesma classificação, mas de forma prática comparada ao método primário.

Método Expedito das Pastilhas – MCTP

O Método Expedito das Pastilhas foi desenvolvido e consolidado por Nogami e Villibor (1994) como um ensaio integrante da Metodologia MCT.

No Método Expedito das pastilhas de Nogami e Villibor (1994), determinou-se que o coeficiente c' seria medido pela contração das pastilhas após a secagem. O coeficiente e' seria calculado pela penetração de uma agulha padrão após a reabsorção de água da pastilha.

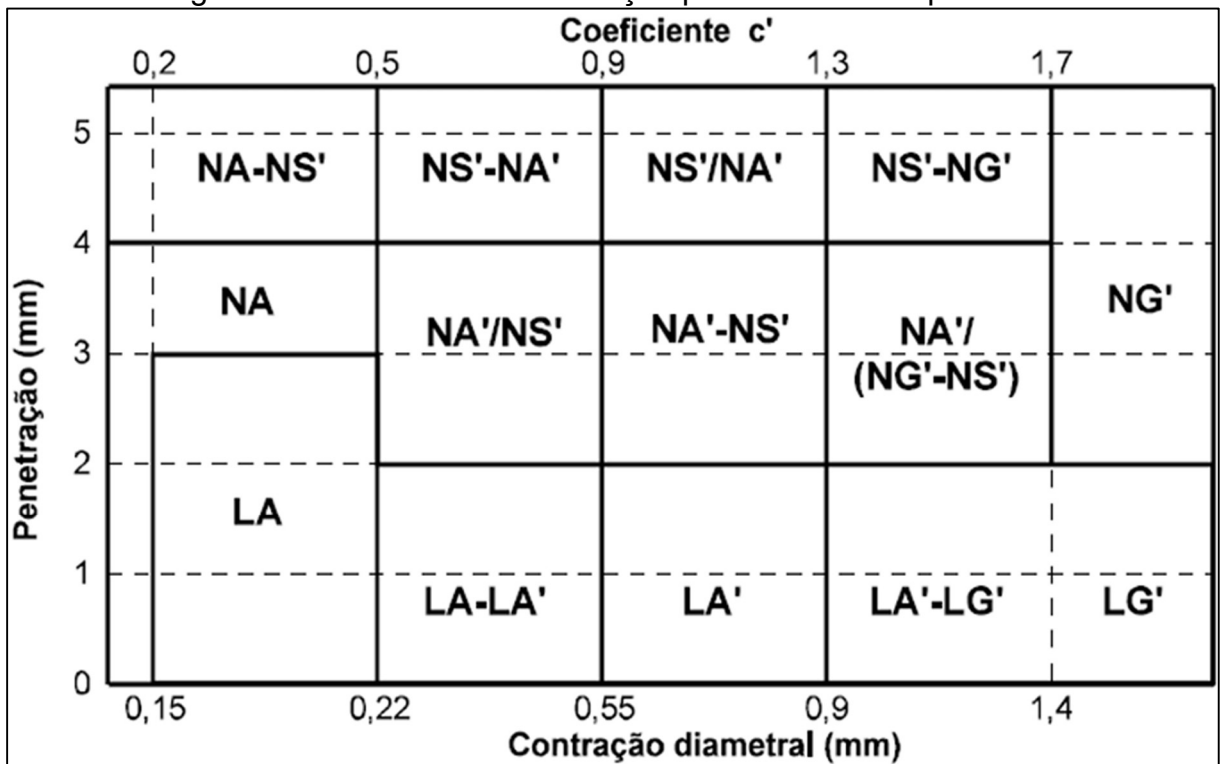
Para calcular o coeficiente c' , utiliza-se o valor da contração diametral (C_t) conforme a Equação 12, quando a profundidade de penetração da água estiver entre 0,1 mm e 0,5 mm. Se a resistência à penetração for superior a 0,6 mm, aplica-se a Equação 13 para corrigir a contração da pastilha moldada.

$$c' = \frac{(\log_{10} Ct + 1)}{0,904} \quad (12)$$

$$c' = \frac{(\log_{10} Ct + 0,7)}{0,50} \quad (13)$$

Após os resultados obtidos do coeficiente c' , classifica-se o solo através do ábaco mostrado na Figura 38.

Figura 38 – Gráfico de classificação pelo método das pastilhas



Fonte: Nogami e Villibor (1994).

APÊNDICES

APÊNDICE A – CLASSIFICAÇÃO MCT PELO MÉTODO EXPEDITO DAS PASTILHAS

Os resultados do ensaio do método das pastilhas é apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - Dados do método expedito das pastilhas

Amostra	nº	Diâmetro (mm)			Contração (mm)		Penetração (mm)				
		Inicial	Médio	Final	Médio	Final	Individual	Média	Individual	Média	Média Total
Amostra 0%	11	21,20		20,53					0,70		
		21,13	21,21	20,49	20,53	0,68			0,50	0,73	
		21,31		20,69					1,00		
	3	21,21		20,5					1,70		
		21,32	21,34	20,81	20,59	0,75			1,00	1,23	
		21,49		20,59				0,72	1,00		0,883
	6	21,56		20,16					0,80		
		21,37	21,41	20,5	20,30	1,11			1,20	1,00	
	8	21,31		20,3					1,00		
		21,03		20,58					0,70		
21,29		21,10	20,52	20,58	0,52			0,80	0,77		
20,98			20,66					0,80			
Amostra 2%	7	21,22		20,25					0,80		
		20,95	21,21	20,15	20,18	1,03			0,70	0,80	
		21,46		20,18					0,90		
	4	21,39		20,18					0,80		
		21,66	21,45	20,43	20,43	1,02			0,60	0,77	
		21,31		20,47				1,08	0,90		0,817
	2	21,02		20,13					0,90		
		21,13	21,26	20,52	20,13	1,13			0,90	0,83	
	9	21,64		20,03					0,70		
		21,44		20,06					1,60		
21,56		21,47	20,18	20,18	1,29			1,00	1,20		
21,42			20,23					1,00			
Amostra 4%	3	21,21		19,52					1,80		
		21,32	21,34	19,27	19,27	2,07			1,70	1,57	
		21,49		19,23					1,20		
	2	21,16		19,35					1,10		
		21,60	21,33	19,60	19,55	1,78			1,50	1,47	
		21,23		19,55				1,81	1,80		1,517
	8	21,39		19,36					1,80		
		21,31	21,20	19,47	19,37	1,83			1,20	1,40	
	1	20,90		19,37					1,20		
		20,94		19,53					1,90		
21,39		20,98	19,60	19,53	1,45			2,60	1,93		
	20,60		19,46					1,30			
Amostra 6%	10	21,44		19,90					1,40		
		21,20	21,33	19,58	19,58	1,75			1,00	1,23	
		21,35		19,47					1,30		
	5	21,50		19,62					1,80		
		21,27	21,45	19,53	19,62	1,83			1,30	1,67	
		21,59		19,67				1,78	1,90		1,467
	7	21,20		19,63					1,20		
		21,43	21,25	19,93	19,63	1,62			1,50	1,37	
	6	21,13		19,57					1,40		
		21,23		19,69					1,90		
21,43		21,48	19,48	19,68	1,80			1,60	1,57		
	21,78		19,68					1,20			

Fonte: Autoria própria (2025).

APÊNDICE B – AVALIAÇÃO DA ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO PELO MÉTODO DA MANCHA

A amostra apresentou baixo teores de consumo do líquido de azul de metileno, representando uma baixos índices de atividade. Inicialmente analisou-se a atividade das argilas em condições de campo, ou seja, natural, conforme a Tabela 17.

Tabela 17 - Ensaio de Adsorção de Azul conforme a metodologia proposta por Fabbri (1994), conforme a norma francesa NF - 94 068 com amostra na condição natural

Metodologia proposta por Fabbri (1994) e em conformidade com a Norma Francesa NF - 94 068				
Amostra com processo natural				
Dados Experimentais				
Amostra	0%	2%	4%	6%
<i>Quantidade (g)</i>	1,000	1,002	1,001	1,000
<i>Azul consumido (ml)</i>	12,00	16,00	22,00	22,00
<i>Argila 0,005 (%) unitária ensaiada</i>	69,99	71,31	72,78	74,19
<i>Argila 0,005 (%) total do solo</i>	47,70	48,60	49,60	50,56
<i>Va</i>	17,14	22,39	30,20	29,65
<i>VB</i>	1,20	1,60	2,20	2,20
<i>Acb</i>	1,71	2,24	3,02	2,97
<i>CTC (meq/100g)</i>	1,20	1,60	2,20	2,20
<i>SE (m²/g)</i>	29,35	39,06	53,76	53,81

Fonte: Autoria própria (2025).

Posteriormente, foi analisada a atividade de argila pelo método da mancha com as amostra calcinadas a 440°C, com intuito de avaliar o solo sem a presença de matéria orgânica, apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Ensaio de Adsorção de Azul conforme a metodologia proposta por Fabbri (1994), conforme a norma francesa NF - 94 068 com amostra na condição calcinada a 440°C

Metodologia proposta por Fabbri (1994) e em conformidade com a Norma Francesa NF - 94 068				
Amostra calcinada em Mufla a 440 ° C por 12 horas				
Dados Experimentais				
Amostra	0%	2%	4%	6%
<i>Quantidade Seca (g)</i>	1,002	0,966	1,004	0,998
<i>Azul consumido (ml)</i>	13,00	14,00	14,00	15,00
<i>Argila 0,005 (%) unitária ensaiada</i>	69,99	71,31	72,78	74,19
<i>Argila 0,005 (%) total do solo</i>	47,70	48,60	49,60	50,56
<i>Va</i>	27,20	29,82	28,11	29,73

<i>VB</i>	1,30	1,45	1,39	1,50
<i>Acb</i>	1,85	2,03	1,92	2,03
<i>CTC (meq/100g)</i>	1,30	1,45	1,39	1,50
<i>SE (m²/g)</i>	31,73	35,45	34,11	36,76

Fonte: Aatoria própria (2025).

APÊNDICE C – DIFRAÇÃO DE RAIOS X

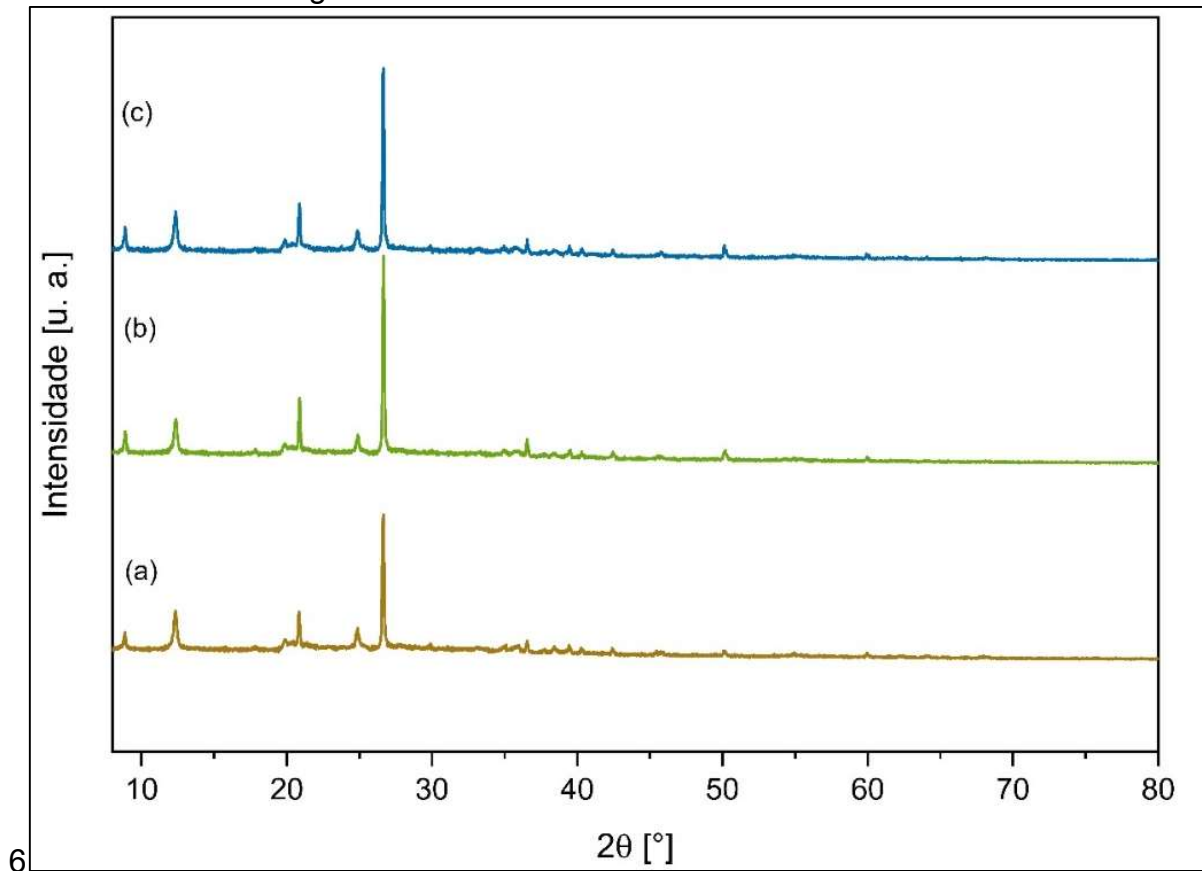
Os resultados dos ensaios de DRX estão descritos na Tabela 19 e expostos graficamente nas Figuras 40 e 41.

Tabela 19 – Identificação das fases mineralógicas encontradas nas amostras

AMOSTRA	MINERAIS
(a)	Caulinita, Ilita, Geotita
(b)	Caulinita, Ilita, Geotita
(c)	Caulinita, Ilita, Geotita
(d)	Caulinita, Motmorilonita, Esmeclita
(e)	Caulinita, Motmorilonita, Esmeclita
(f)	Caulinita, Motmorilonita, Esmeclita

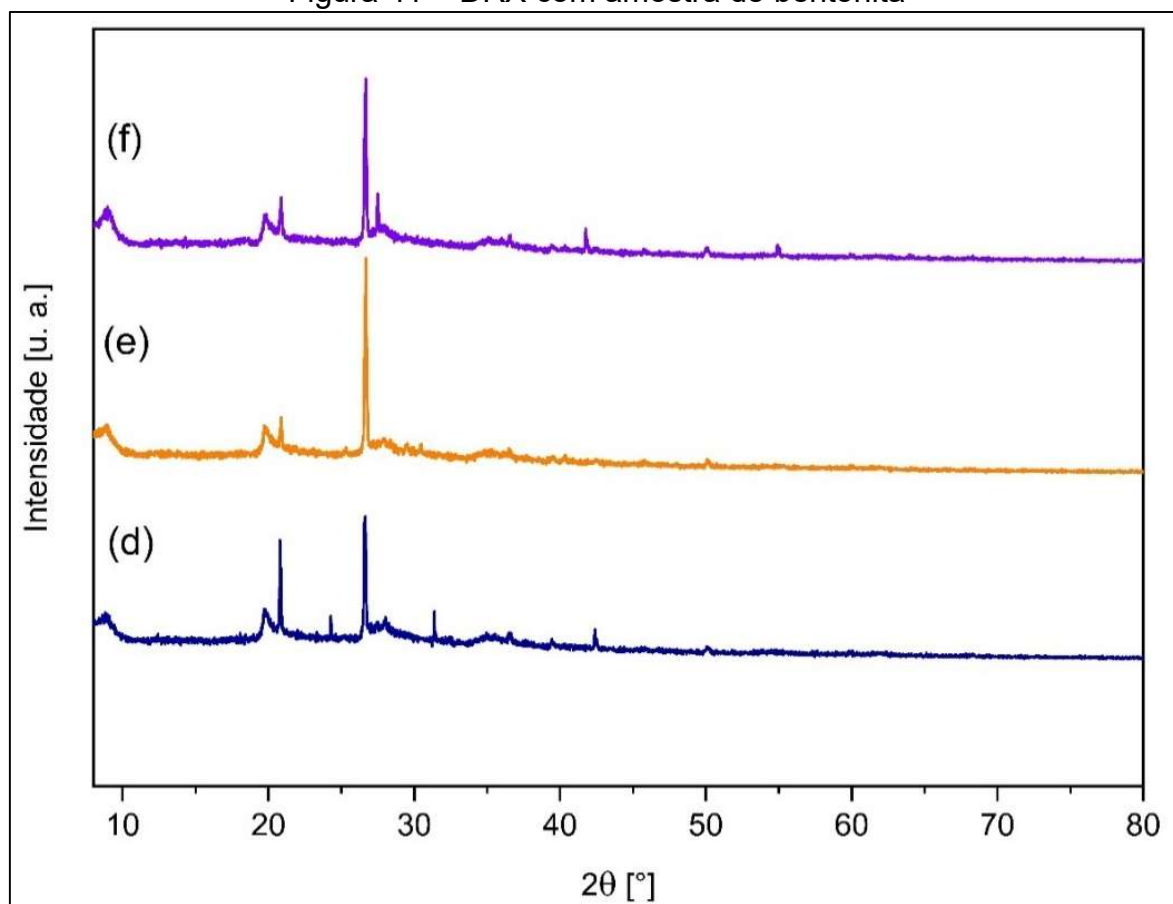
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 40 – DRX com amostra de solo natural



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 41 – DRX com amostra de bentonita

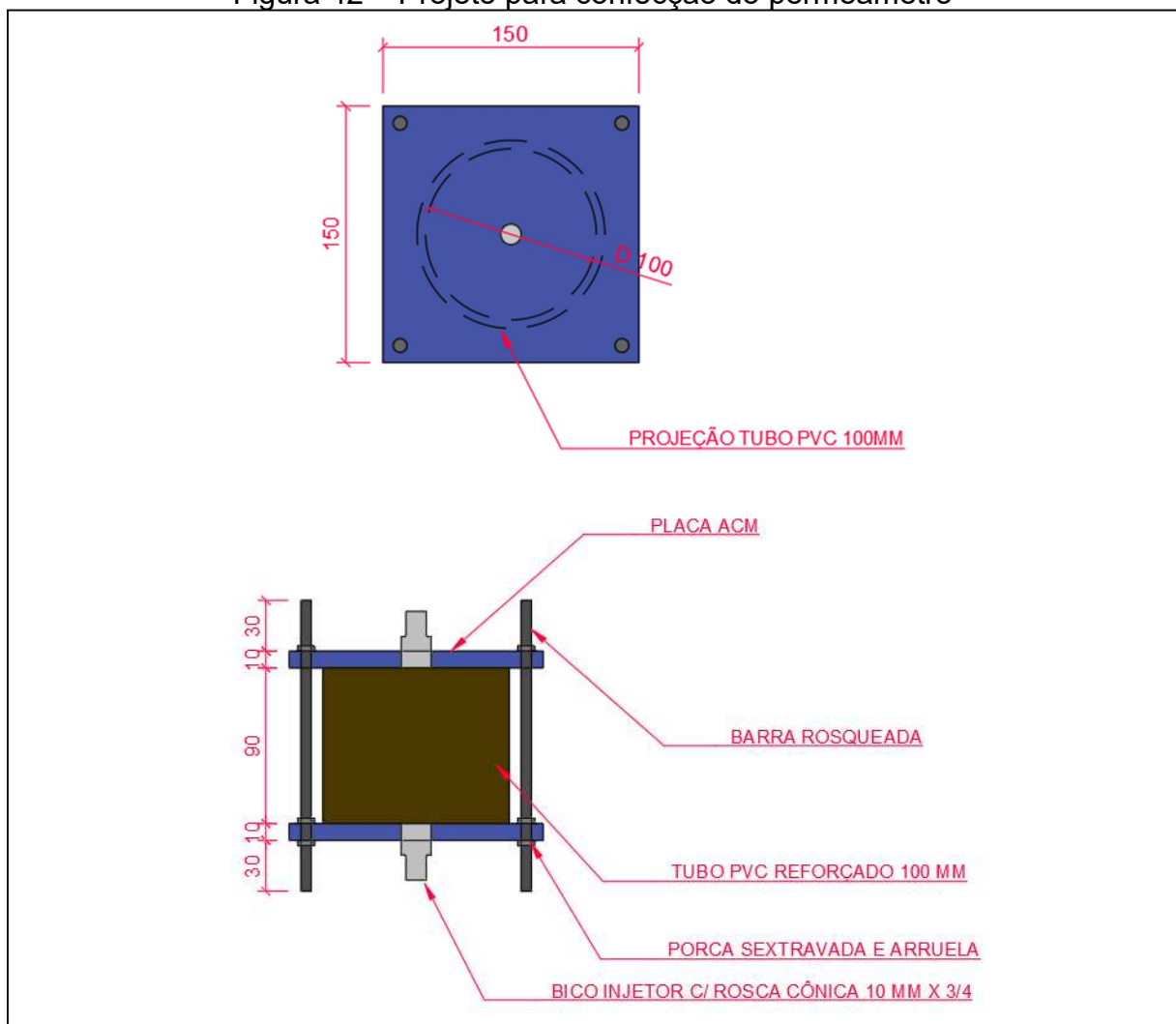


Fonte: Autoria própria (2025).

APÊNDICE D – PROJETO PERMEÂMETRO

O sistema de ensaio e o desenvolvimento do equipamento desta pesquisa foi fundamentada em trabalhos de Romanini e Benatti (2015) e Alonso (2005), sendo um sistema de aferição do gradiente hidráulico, composto por buretas para aferição do fluido percolado, manta geotêxtil para regularização das camadas, e permeâmetros de parede rígida, como demonstra a Figura 42.

Figura 42 – Projeto para confecção do permeâmetro



Fonte: Autoria própria (2025).