



CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS

Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 1.162, de 13/10/16, D.O.U nº 198, de 14/10/2016
ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL

Idebrano Cardoso da Silva Junior

AVALIAÇÃO DO SOLO UTILIZADO EM CAMADAS DE BASE E COBERTURA NO
ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS-TOCANTINS.

Palmas – TO

2018

Idebrano Cardoso da Silva Junior

AVALIAÇÃO DO SOLO UTILIZADO EM CAMADA DE BASE E COBERTURA NO
ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS-TOCANTINS.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC II) elaborado e apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientadora: Prof. Jacqueline Henrique

Palmas – TO

2018

Idebrano Cardoso da Silva Junior

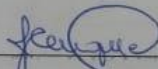
AVALIAÇÃO DO SOLO UTILIZADO EM CAMADAS DE BASE E COBERTURA NO
ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS-TOCANTINS.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC II) elaborado e
apresentado como requisito parcial para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil pelo Centro
Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientadora: Prof. Jacqueline Henrique

Aprovado em: 06 / 11 / 18

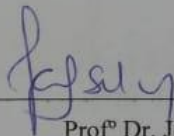
BANCA EXAMINADORA



Prof. Jacqueline Henrique

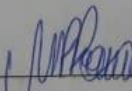
Orientadora

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP



Prof. Dr. José Geraldo Delvaux Silva

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP



Prof. Dra. Michele Ribeiro Ramos

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

Palmas – TO

2018

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida, autor de m destino, meu guia, socorro presente na hora de angústia, aos meus amados pais Idebrano Cardoso da Silva e Rosângela Antônio Mendanha, e toda minha família, que falta vocês me fazem!!!

AGRADECIMENTOS

- A Deus, por me dar saúde e força para conseguir cumprir minhas metas pessoais e obrigações durante a graduação de Engenharia Civil.

- A minha orientadora, Prof. Jacqueline Henrique, que acreditou em mim aceitando-me como aluno, a ela expressarei para sempre meu reconhecimento pela competência profissional e humana com que conduziu minha orientação, pela sua compreensão, estímulo e incentivo. Obrigado por estar contribuindo enormemente com minha formação acadêmica e pessoal durante o período em que estiver sob sua orientação.

- Aos meus colegas pelos momentos de estudo e diversão, em especial à minha namorada Thaynara, por estar presente nos momentos importantes da minha vida, pelo carinho, companheirismo e incentivo. Agradeço também ao meu amigo Miller que me acompanhou na realização dos ensaios laboratoriais.

- À toda minha família, por sempre apoiar minhas decisões, incentivar e compreender a minha ausência. Quero agradecer em especial meu pai e minha mãe, que sempre esteve ao meu lado, me dando carinho, amor, e ao mesmo tempo me passando todos os seus conhecimentos.

- A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação.

RESUMO

SILVA JÚNIOR, Idebrano Cardoso da. **AVALIAÇÃO DO SOLO UTILIZADO EM CAMADAS DE BASE E COBERTURA NO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS-TOCANTINS**. 2018. 46p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil). Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas/TO.

Atualmente toda ação do homem que gera impactos sobre o meio ambiente é motivo de discussão, uma vez que, as normativas exigem a realização de medidas mitigadoras. A disposição final dos resíduos sólidos urbanos é um grande problema, devido à importância de se preservar o meio ambiente. Uma maneira ambientalmente correta para disposição de resíduos sólidos é em aterros sanitários. Porém, vários devem ser os cuidados tomados na execução de um aterro sanitário para que este atenda às normas ambientais. Um destes cuidados é a impermeabilização das camadas de base e de cobertura do aterro, evitando que o líquido percolado, gerado pela decomposição dos resíduos sólidos e pela penetração de chuva na célula do aterro contamine o solo e as águas subterrâneas da região. Essa pesquisa teve como objetivo estudar o solo utilizado para impermeabilizar as camadas de base e cobertura do aterro sanitário do Estado do Tocantins. Na primeira etapa da pesquisa foi realizada a coleta e caracterização dos solos, através de ensaios de Mecânica dos Solos. Posteriormente, montou-se o piloto experimental de fluxo, que consiste em permeâmetro que simulam a percolação do líquido através do solo. A amostra de solo foi compactada após obter a umidade ótima do ensaio de compactação. Os resultados indicaram que o solo é ideal para ser utilizado na camada de cobertura diária e intermediária, em virtude do coeficiente de permeabilidade encontrado está na ordem de 10^{-6} cm/s. A utilização do mesmo para a camada base, se torna comprometida pois a normatização exige um coeficiente na ordem de 10^{-7} cm/s. Com relação a cobertura final das células também seria ideal o uso de um solo impermeável pois quanto mais impermeável for, menor será a quantidade de água que irá infiltrar nas células do aterro, e com isso, menor será o volume de líquido percolado gerado.

Palavras-chave: Aterro Sanitário, resíduos sólidos, impermeabilização e solo.

ABSTRACT

Nowadays every action of the man that generates impacts on the environment is a reason for discussion, since the regulations require the implementation of mitigating measures. The final disposal of municipal solid waste is a major problem because of the importance of preserving the environment. An environmentally sound way to dispose of solid waste is in landfills. However, a lot of care should be taken in the implementation of a landfill so that it meets environmental standards. One of these precautions is to waterproof the base layers and cover the landfill, avoiding leachate generated by the decomposition of solid waste and rain penetration into the landfill cell to contaminate the soil and groundwater of the region. In this research the soil used to waterproof the base layers and cover of the sanitary landfill of the State of Tocantins was studied. In the first stage of the research the soil collection and characterization was performed through soil mechanics. Subsequently, the experimental pilot of flow was set up, which consists of a permeameter that simulates the percolation of percolated liquid in the soil. The soil sample was compacted after obtaining the optimum moisture of the compaction test. The results indicated that the soil is ideal to be used in the daily and intermediate cover layer, because the permeability coefficient found is in the order of 10^{-6} cm/s. The use of the same for the base layer, becomes compromised because the standardization requires a coefficient in the order of 10^{-7} cm/s. With regard to the final coverage of the cells, the use of impermeable soil would also be ideal because the more impermeable the less the amount of water that will infiltrate the cells of the landfill, and the less the volume of percolated liquid generated.

Keywords: Landfill, solid waste, waterproofing and soil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1: Coeficiente de Permeabilidade.....	22
Figura 1: Esquema de um Aterro Sanitário.....	16
Figura 2: Curvas de Compactação.....	23
Figura 3- Localização do Aterro Sanitário de Palmas-TO.....	26
Figura 4- Lavagem do material pulverulento.....	27
Figura 5- Picnômetro com solo e água.....	28
Figura 6- Limite de Liquidez.....	28
Figura 7- Limite de Plasticidade (a) Moldagem do corpo de Prova(b).....	29
Figura 8- Ensaio de Compactação.....	30
Figura 9- Corpo de Prova (a) Ensaio de permeabilidade (b).....	31
Figura 10- Curva de Granulometria.....	32
Figura 11- Limite de Liquidez.....	33
Figura 12- Curva de Compactação.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise Granulométrica- NBR 7181	32
Tabela 2 - Índice de Atterberg	33
Tabela 3 - Permeabilidade do Solo no Ramo Úmido	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CEULP	Centro Universitário Luterano de Palmas
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Normas Brasileiras
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
ULBRA	Universidade Luterana do Brasil
PVC	Policloreto de Polivinila
PEAD	Poliétileno de Alta Densidade

LISTA DE SÍMBOLOS

cm	Unidade de Medida “centímetros”
m	Unidade de Medida “metros”
mg/l	Unidade de Volume “miligramas por lito”
mm	Unidade de Medida “milímetros”
γ_d	Massa Específica Aparente Seca de Solos
w%	Teor de Umidade
ρ_s	Massa Específica dos Grãos do Solo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	13
1.2 HIPÓTESES	13
1.3 OBJETIVOS	13
1.3.1 Objetivo Geral	13
1.3.2 Objetivos Específicos	13
1.4 JUSTIFICATIVA	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 ATERRO SANITÁRIO	15
2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS	16
2.3 IMPERMEABILIZAÇÕES	17
2.3.1 Camada Base	17
2.3.1.1 Barreiras impermeáveis com solo local;	18
2.3.1.2 Barreiras impermeáveis com geossintéticos	18
2.3.2 Camada de Recobrimento	19
2.4 SOLOS	19
2.4.1 Tipos de solos	19
2.4.1 Permeabilidade do solo	20
2.4.2 Compactação do solo	22
2.5 IMPACTOS AMBIENTAIS	24
3. METODOLOGIA	26
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO NATURAL	26
3.1.1 Ensaio de granulométrica	27
3.1.2 Determinação da Massa Específica dos Grãos	27
3.1.3 Avaliação do Limite de Liquidez (LL)	28
3.1.4 Avaliação do Limite de Plasticidade (LP)	29
3.2 COMPACTAÇÃO DO SOLO	29
3.3 EXPERIMENTOS DE FLUXO ATRAVÉS DE PERMEÂMETROS COM CARGA HIDRÁULICA VARIÁVEL;	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	32
4.2 COMPACTAÇÃO DO SOLO	34
4.3 PERMEABILIDADE DO SOLO	34

4.4 SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO	36
5. CONCLUSÕES.....	37
6. REFERÊNCIAS	38
APÊNDICES	41

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional na maioria das cidades brasileiras e a evolução econômica do país, favorece para o aumento na geração de resíduos sólidos, acarretando vários problemas de saneamento devido à falta de planejamento e infraestrutura. Uma solução imediatista utilizada nos municípios foi o descarte destes resíduos em lixões a seu aberto, gerando impactos ao solo, recursos hídricos, até mesmo a própria população decorrente do favorecimento da proliferação de doenças.

O descarte em aterros sanitários surgiu como uma alternativa para os lixões e permite a utilização de várias técnicas de tratamento, dentre elas: compostagem, incineração, plasma-pirólise e reciclagem, pois de acordo com a NBR 8419/92 a destinação é feita de maneira ambientalmente correta e utiliza-se princípios de engenharia.

Segundo Fagundes (2009), o aterro sanitário é um processo utilizado para a disposição de resíduos sólidos no solo, particularmente lixo domiciliar considerando resíduo perigoso. Ele permite um confinamento seguro em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública. O isolamento é feito entre camadas impermeáveis cobertas com material inerte geralmente solo e geomembranas.

Atualmente as barreiras impermeáveis é uma necessidade em várias obras de engenharia, em especial, naquelas destinadas a disposição de resíduos, como os aterros e as lagoas de efluentes. Nos aterros sanitários sua principal função é evitar a contaminação do lençol freático com a criação de uma barreira artificial à infiltração do chorume.

Normalmente a impermeabilização da parte inferior do aterro pode ser feita através de camadas de solo impermeável (argila) ou de aplicação de geomembranas sintéticas (mantas impermeabilizantes de PVC ou PEAD), ou ainda, através de argilas expansivas. Porém é importante lembrar que na maioria dos casos é necessário o uso de geossintéticos juntamente com a compactação do solo a fim de garantir à estanqueidade do sistema (OBLANDEN, et al., 2009).

Além da base, deve se fazer a impermeabilização da camada de cobertura afim de limitar a exposição do lixo ao ambiente atmosférico e reduzir a entrada de águas pluviais na massa de lixo, uma vez que, ao interagir com o lixo ocorre o favorecimento para percolação do chorume. Esta camada também é essencial para o controle dos gases de efeito estufa produzidos durante a decomposição do lixo, pois favorece a captação, seguida da sua queima.

Este trabalho dará ênfase aos sistemas de impermeabilização das camadas bases e de cobertura do aterro sanitário da cidade de Palmas-TO. O objetivo é avaliar o solo das jazidas existentes no local, determinando suas características físicas e mecânicas para posteriormente

determinar a permeabilidade e em seguida recomendar um sistema de impermeabilização capaz de assegurar a segurança ambiental no local.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Atualmente muito se discute sobre o descarte dos resíduos sólidos em lixões devido a contaminação dos recursos naturais ao seu redor pelos contaminantes gerados a partir da decomposição do lixo. A fim de minimizar estes impactos as normativas passaram a exigir o descarte de resíduos em aterros sanitários, pois estes estarão isolados em valas impermeáveis, garantido menores impactos socioambientais. O sucesso da impermeabilização depende de vários fatores, entre eles o uso de solos que alcancem impermeabilidades de acordo com o recomendado em normas. Diante do contexto, quais são as condições do solo necessárias para a compactação em loco visando a impermeabilização do local utilizado o solo das jazidas presentes no aterro sanitário da cidade de Palmas-TO?

1.2 HIPÓTESE

De acordo com alguns trabalhos presentes na literatura sobre a impermeabilização em aterros sanitário, feitos em outras regiões, pode se afirmar que o uso de solos argilosos garante impermeabilizações significativas, porém na grande maioria, mesmo atingindo baixíssima permeabilidade, normalmente se usa o conjunto solo compactado e geomembranas para garantir a estanqueidades do sistema. Por se tratar de solos com altíssimo teor de argila, espera se que a impermeabilização do solo após execução da compactação atinja valores de permeabilidade inferior a 10^{-5} cm/s.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento do solo utilizado como material de impermeabilização das camadas de base e cobertura de valas do aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos na cidade de Palmas-TO.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar as propriedades físicas dos solos utilizados para compactação das camadas de base e cobertura das valas;
- Realizar experimentos de fluxo através de permeômetros com carga hidráulica variável;

- Sugerir de acordo com a permeabilidade um sistema de impermeabilização apropriado para o aterro.

1.4 JUSTIFICATIVA

Nas últimas décadas, fatores relacionados aos impactos ambientais têm contribuído para debates internacionais, visando propor soluções imediatas a fim de minimizar as consequências negativas sobre o meio ambiente. O descarte dos resíduos sólidos e sem dúvida, um grande problema enfrentado não só no Brasil, mais também, em outros países subdesenvolvidos.

A disposição feita diretamente no solo sem nenhum controle, gera impactos diretos no solo, recursos hídricos, fauna e flora de região, entre outros. Diante do contexto, a construção de aterros sanitários é cada vez mais cobrada pelos órgãos de segurança ambiental e estes são construídos através de tecnologias desenvolvidas pela engenharia.

A impermeabilização das valas “ambiente destinado para armazenamento do lixo”, é sem dúvida, o que garante o sucesso de todo o sistema. Dentre suas funções, as principais são: evitar a infiltração do chorume no solo, diminuir o contato do lixo com a atmosfera e minimizar a propagação do gás metano para o meio ambiente.

Dentre as técnicas de tornar-se um solo impermeável, uma das mais utilizadas é a impermeabilização feita pela compactação do próprio solo, porém, para atingir valores significativos e aceitáveis pelas normativas, é necessário inúmeros conhecimentos do mesmo, ou seja, qual o percentual de material fino e grosso, qual percentual de umidade ideal para compactação, entre outros. Neste contexto surgiu a necessidade de um estudo detalhado sobre o solo que será usado para impermeabilização em aterros sanitários.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ATERRO SANITÁRIO

O aumento na geração dos resíduos sólidos é uma consequência do crescimento populacional na maioria das cidades brasileiras. Os gestores destes municípios utilizam-se como solução imediatista para a falta de infraestrutura de serviços urbanos o descarte dos resíduos sólidos em lixões a seu aberto, gerando impactos ambientais ao solo, recursos hídricos, dentre outros (FERRI et al., 2013).

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), realizada em 2008 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 50,8% dos municípios brasileiros possuem como destinação final de seus resíduos sólidos os lixões, 22,5% usam aterros controlados e 27,7% usam aterros sanitários.

Vários municípios, de pequeno porte principalmente na região norte e nordeste do país, os resíduos são simplesmente depositados em locais distantes da visão dos moradores, sem os cuidados sanitários necessários para a disposição adequada desses resíduos (FAGUNDES, 2009). Nestes locais não possuem tratamento do chorume, líquidos percolados ou lixiviados, ou controle dos gases de efeito estufa produzidos em sua decomposição, gerando um sério impacto ambiental, e conseqüentemente a necessidade de um cuidado maior com a disposição dos resíduos sólidos através dos aterros sanitários (MASSUKADO, 2006).

A NBR 8419/92 define aterro sanitário como “o método de disposição de resíduos sólidos no solo, sem provocar prejuízos ou ameaças à saúde e à segurança, utilizando-se de princípios de engenharia, de tal modo, a confinar o lixo no menor volume possível, cobrindo-o com uma camada de terra, ao fim do trabalho de cada dia, ou mais frequentemente, conforme o necessário”.

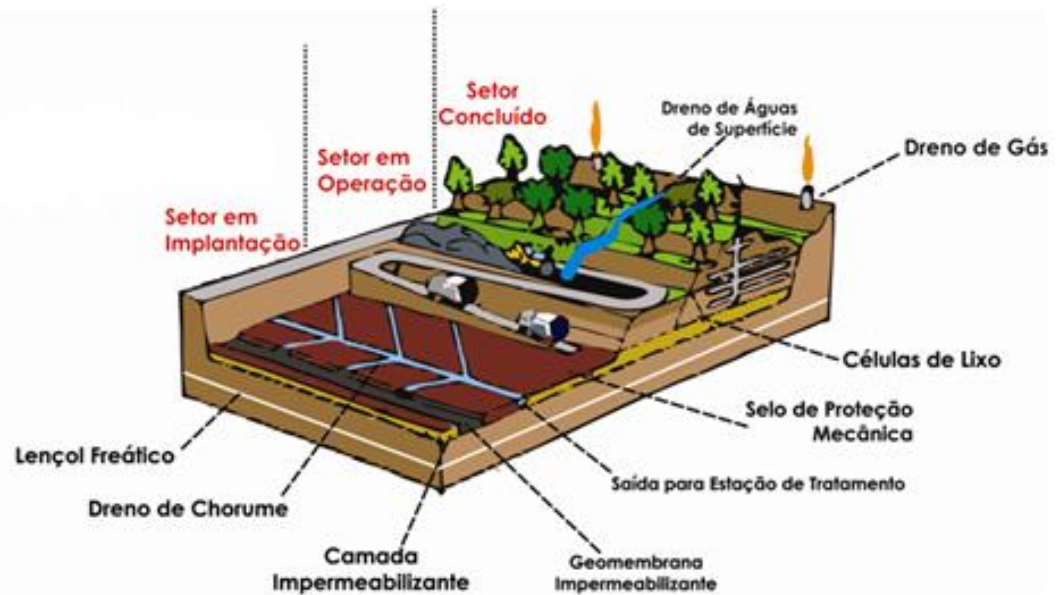
O aterro sanitário é um processo ambientalmente correto utilizado para a disposição de resíduos sólidos no solo, dentre eles lixo domiciliar considerando resíduo perigoso. O aterro garante um confinamento seguro em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública. Apresenta como forma de disposição final no solo, mediante confinamento em camadas cobertas com material inerte, geralmente solo ou geomembranas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais (FAGUNDES, 2009).

O aterro sanitário possui sistemas que permite o tratamento de poluente gerados pela decomposição do lixo, dentre estes sistemas podem ser citados o sistema de drenagem para o chorume “líquido preto e tóxico”, que após ser recolhido passa por um tratamento específico

para em seguida ser devolvido ao meio ambiente sem risco de contaminação, além de um sistema de captação dos gases liberados, como metano, seguida da sua queima (REIS, 2004).

Para garantir a eficiência dos aterros sanitários e conseqüentemente diminuir o risco de contaminação do meio ambiente com a infiltração do chorume e a emissão de gases “metano” formado pela decomposição dos resíduos é necessário garantir a impermeabilização na camada base e de recobrimento (OBLANDEN, et al., 2009). A figura a seguir esquematiza toda estrutura existente em um aterro sanitário.

Figura 1: Esquema de um Aterro Sanitário.



Fonte: ALCANTARA, (2010).

2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS

Resíduos sólidos constituem aquilo que genericamente se chama lixo, ou seja, todos os materiais que resultam das atividades humanas e que serão descartados, muitas vezes podem ser aproveitados tanto para reciclagem como para sua reutilização. Em relação ao tratamento de resíduos sólidos, são descritas na literatura diferentes técnicas, dentre elas: compostagem, incineração, tratamento com micro-ondas, plasma-pirólise e reciclagem (ALCANTARA, 2010).

Segundo o levantamento divulgado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), de 2003 a 2014 a geração de lixo no Brasil apresentou um aumento de 29%. A taxa é cinco vezes maior que o crescimento populacional no período, que foi de 6%. Ainda segundo o levantamento, a produção descontrolada de lixo está relacionada com a evolução econômica do país, que tem consumido em quantidade nunca

vista sem se preocupar com o descarte dos materiais. “Tivemos uma curva ascendente maior até 2012. Agora, observamos um crescimento bem menor, reflexo da estagnação da economia”, afirmou.

A decomposição dos resíduos sólidos produz um líquido malcheiroso de coloração negra, parecida com o esgoto doméstico, porém bem mais concentrado e com DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) da ordem de 10.000 a 20.000 mg/l, denominado chorume, percolado. A água da chuva que cai sobre o “lixo”, percola através do mesmo carregando o chorume e a matéria orgânica transformada, dando origem a um volume líquido que pode causar problemas de contaminação do solo e dos recursos hídricos da região (OBLANDEN, et al., 2009).

Além da produção do chorume, durante o processo de decomposição do lixo ocorre a formação do gás metano, considerado um gás combustível, é uma das alternativas de produção energética de fontes renováveis. Porém, este faz parte do grupo dos “gases de efeito estufa”. A produção natural corresponde a 20% das emissões, e a produção antropogênica corresponde a 80% de suas emissões (SOARES, 2012).

2.3 IMPERMEABILIZAÇÕES

A NBR 13896/97 define a impermeabilização como a “deposição de camadas de materiais artificiais ou naturais, que impeça ou reduza substancialmente a infiltração de água no solo dos líquidos percolados, através da massa de resíduos”.

A escolha por uma barreira impermeável que se utiliza de materiais naturais, sintéticas ou argila compactada do tipo é influenciada pelo uso a que se destina, pelo meio ambiente físico, pela química da solução percoladora e da água subterrânea, pela vida útil do projeto, taxa de infiltração e restrições físicas (REBELO, 2003).

A impermeabilização feita em aterros sanitários tem a função de evitar a contaminação do lençol freático com a criação de uma barreira artificial à percolação do chorume proveniente da decomposição de resíduos sólidos e da ação das águas pluviais, bem como garantir as condições mecânicas necessárias para a manutenção do sistema de isolamento do lixo (OBLANDEN, et al., 2009).

2.3.1 Camada Base

A impermeabilização da base e das laterais dos aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - RSU, deverá atuar como uma barreira para isolar os resíduos e proteger a fundação do aterro, evitando-se a contaminação do subsolo e aquíferos subjacentes, pela migração de percolados e/ou biogás (FRANCESCHET, 2006).

Em função desses elementos, a impermeabilização da base do aterro pode ser feita através de camadas de solo impermeável “argila” ou de aplicação de geomembranas sintéticas, mantas impermeabilizantes de PEAD ou PVC, ou ainda, através de argilas expansivas. Porém é importante lembrar que na maioria dos casos é necessário o uso de geossintéticos juntamente com a compactação do solo a fim de garantir a estanqueidade do sistema (OBLANDEN, et al., 2009).

2.3.1.1 Barreiras impermeáveis com solo local;

Quando as características de permeabilidade do solo no local escolhido para o aterro são as ideais, com baixos coeficientes de permeabilidade ($<10^{-7}$ cm/s) é provável que não seja necessária a instalação de uma geomembrana para impermeabilização (NBR 13896, 1997).

Segundo Gomes (2003), os requerimentos recomendados para alcançar a condutividade hidráulica (k) menor ou igual a 10^{-7} cm/s são:

- Porcentagem de finos (peso seco passante na peneira 200): $\geq 20\%$, idealmente $\geq 30\%$;
- Porcentagem de pedregulhos (peso seco retido na peneira 4): $\leq 30\%$;
- Índice de plasticidade: $\geq 7\%$, idealmente $\geq 10\%$;
- Tamanho máximo de partícula: ≤ 50 mm, idealmente ≤ 25 mm.

2.3.1.2 Barreiras impermeáveis com geossintéticos

Entre os Geossintéticos mais recomendados estão os Geotêxteis, as Geogrelhas, as Geomembranas e finalmente os Geocompostos (associação de um ou mais Geossintéticos). Como já mencionado, a principal função é evitar a contaminação do lençol freático com a criação de uma barreira artificial à percolação do chorume (OBLANDEN, et al., 2009).

Segundo Rebelo (2009), vários tipos de barreiras impermeáveis são utilizados para contenção de resíduos, e estas podem variar significativamente em complexidade. Geralmente as geomembranas não são utilizadas sozinhas em função dos possíveis defeitos que podem apresentar, e que podem resultar em grandes fluxos de percolação. Desta forma, podem ser constituídas de uma camada simples ou dupla, quando apresentam um único material, ou compostas, quando são constituídas de uma combinação de diferentes materiais “geomembranas + solo compactado”.

Em aterros de resíduos sólidos urbanos utiliza-se geomembranas na composição de estruturas de base e cobertura como componente para impermeabilização. Em geral, elas são sobrepostas a uma camada de solo compactado, com espessura mínima de 60 cm e $k < 10^{-7}$ cm/s.

Em caso de degradação da geomembrana, o solo impede o vazamento do líquido. Por outro lado, a presença da geomembrana reduz a exposição do solo ao lixiviado (GOMES et al., 2003).

Especificamente em aterros de resíduos, as geomembranas de PEAD são as mais utilizadas devido à sua resistência química, mecânica e durabilidade. No mercado brasileiro tem-se utilizado geomembranas não só de PEAD, mais também de PVC, para impermeabilizar das bases de aterro e lagos (LOPES, 2006).

2.3.2 Camada de Recobrimento

A camada de cobertura das valas nos aterros sanitários garante a eficiência de todo o sistema pois limita a exposição do lixo ao ambiente atmosférico. Esta camada apresenta grande capacidade de influência tanto na liberação de gases do aterro, como na entrada de ar atmosférico e águas pluviais na massa de lixo (OBLANDEN, et al., 2009).

A NBR 13896/97 define o cobrimento final das valas como um sistema responsável por minimizar a infiltração da água da chuva na camada de resíduo, devendo exigir pouca manutenção, não estar sujeito à erosão, possuir um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do aterro e não apresenta fratura.

Segundo Gomes et al. (2003), a camada de cobertura é dividida em: cobrimento diário que deve ser realizada ao fim de cada jornada de trabalho com espessura de 20 cm de solo, a cobertura intermediária, necessário naqueles locais onde a superfície de disposição ficará inativa por períodos mais prolongados aproximadamente 30 dias, aguardando, por exemplo, a conclusão de um patamar para início do seguinte, e por última cobertura final feito em valas que serão inativadas.

2.4 SOLOS

Os solos são materiais formados a partir do intemperismo das rochas, por desintegração mecânica através de agentes como vento, temperatura, água e vegetação ou decomposição química que consiste na alteração química ou mineralógica das rochas de origem. Quando ocorre a desintegração mecânica formam-se os pedregulhos e areias (partículas grossas), siltes (partículas intermediárias) e, somente em condições especiais, as argilas. Normalmente a formação das argilas se dá pela decomposição química (FRANCESCHET, 2006).

2.4.1 Tipos de solos

- Solos Residuais: São solos formados através da degradação da rocha original cujas propriedades são semelhantes à rocha de origem, encontrando até mesmo blocos

isolados de rochas semi-alteradas. São solos que permanecem no local da rocha matriz, observando-se uma gradual transição do solo até a rocha (MIGUEL et al., 2007).

- Solos Transportados: são solos provenientes do transporte de materiais decompostos através de um agente transportador, como rios, vento, chuva, etc. Em geral são solos mais finos que os residuais, pois o agente transportador não consegue carregar material muito graúdo devido ao peso deste (MIGUEL et al., 2007).

O Sistema Unificado de Classificação dos Solos agrupa o solo em duas categorias distintas (DAS, 2007):

- Solos de granulometria grossa que possuem menos de 50% de suas partículas passando pela peneira N° 200. Normalmente são solos pedregulhosos e arenosos.
- Solos de granulometria fina, compostos de 50% ou mais de materiais passantes na peneira N° 200. Neste grupo estão os solos siltosos e argilosos.

2.4.1 Permeabilidade do solo

Segundo Caputo (1988), a permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento de líquidos através dele, sendo o seu grau de permeabilidade expresso pelo “coeficiente de permeabilidade”. O conhecimento da permeabilidade de um solo é de grande importância em diversos problemas práticos da engenharia, como drenagem, rebaixamento do nível d’água e recalques.

A permeabilidade pode ser obtida através da lei de Darcy, que em 1850 realizou um estudo para verificar como alguns fatores geométricos influenciavam na vazão da água, o que gerou a seguinte equação:

$$Q = K \times \frac{h}{L} \times A$$

Onde:

Q = vazão;

A = área;

k = constante de permeabilidade;

O gradiente hidráulico i é representado pela relação da carga que dissipa na percolação h pela distância ao longo da qual a carga se dissipa L .

$$Q = k \times i \times A$$

A velocidade de percolação v é a razão da vazão (Q) pela área (A), ou seja:

$$v = k \times i$$

Segundo Caputo (1988) e Pinto (2000) há várias maneiras para determinar o coeficiente de permeabilidade dos solos, sendo os mais utilizados:

- **Permeâmetro de carga constante:** utilizado para solos mais permeáveis (solos arenosos). Neste ensaio mede-se a quantidade de água, mantida a nível constante, que atravessa a amostra de solo durante um determinado tempo. O coeficiente de permeabilidade é calculado diretamente pela Lei de Darcy.

$$k = \frac{Q \times L}{A \times h \times t}$$

Onde:

Q = quantidade de água (cm³);

A = área do permeâmetro (cm²);

L = altura da amostra (cm);

h = carga hidráulica dissipada na percolação (desnível entre entrada e saída da água) (cm);

t = tempo;

- **Permeâmetro de carga variável:** utilizado para solos menos permeáveis ($k < 10^{-3}$ cm/s). Mede-se o tempo (t) que o líquido no tubo leva a percorrer a altura h_i até a h_f .

$$k = 2,3 \frac{a \times H}{A \times \Delta t} \log \frac{h_1}{h_2}$$

Onde:

k = coeficiente de permeabilidade (cm/s);

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

H = altura inicial do corpo-de-prova (cm);

A = área do corpo-de-prova (cm²);

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

h_1 = carga hidráulica no instante t_1 (cm);

h_2 = carga hidráulica no instante t_2 (cm).

Segundo a NBR 13292/95, o solo pode ser classificado de acordo com o coeficiente de permeabilidade. A norma classifica os solos conforme o quadro 1 a seguir:

Quadro 1: Coeficiente de Permeabilidade.

Permeabilidade		Tipo de solo	K(cm/s)
Solos permeáveis	Alta	Pedregulhos	$> 10^{-3}$
	Alta	Areias	10^{-3} a 10^{-5}
	Baixa	Siltes e argilas	10^{-5} a 10^{-7}
Solos impermeáveis	Muito baixa	Argila	10^{-7} a 10^{-9}
	Baixíssima	Argila	$< 10^{-9}$

Fonte: NBR 13292/95

Segundo Gomes (2003), os requerimentos recomendados para alcançar a condutividade hidráulica (k) menor ou igual a 10^{-7} cm/s são:

- porcentagem de finos (peso seco passante na peneira 200): $\geq 20\%$, idealmente $\geq 30\%$;
- porcentagem de pedregulhos (peso seco retido na peneira 4): $\leq 30\%$;
- índice de plasticidade: $\geq 7\%$, idealmente $\geq 10\%$;
- tamanho máximo de partícula: $\leq 50\text{mm}$, idealmente $\leq 25\text{mm}$.

Ainda segundo o autor a permeabilidade do solo a ser utilizado em uma camada impermeabilizante é o fator mais importante para a determinação da eficiência a longo prazo. Solos argilosos com permeabilidade inferior a 10^{-7} cm/s são comumente considerados adequados para fornecer proteção a longo prazo ao meio ambiente.

2.4.2 Compactação do solo

Na mecânica dos solos, o processo de compactação visa, através da aplicação de cargas estáticas ou dinâmicas, reduzir os vazios do solo, melhorando as suas características de resistência, de deformidade e permeabilidades. A compactação do solo serve para tornar o aterro mais homogêneo e aumentar a intimidade de contato entre os grãos.

Segundo Pinto (2000), as propriedades dos solos compactados dependem de vários fatores, entre eles, do teor de umidade e do processo de compactação, resultando o peso específico seco, o grau de saturação e a estrutura do solo. Estes parâmetros são responsáveis pela variação do coeficiente de permeabilidade no campo. Um solo com baixa permeabilidade, quando compactado de forma imprecisa devido à realização de um processo de compactação não adequado, o percentual de permeabilidade será maior que o desejado.

A compactação do solo pode ser feita manualmente ou mecanizada. Através do conhecimento do tipo de solo a ser utilizado para a compactação e do tipo de obra, poderá ser definida a umidade em que o solo deve se encontrar na ocasião e a densidade a ser atingida,

objetivando reduzir futuros recalques, aumentar a rigidez e a resistência do solo e reduzir a permeabilidade (FRANCESCHET, 2006)

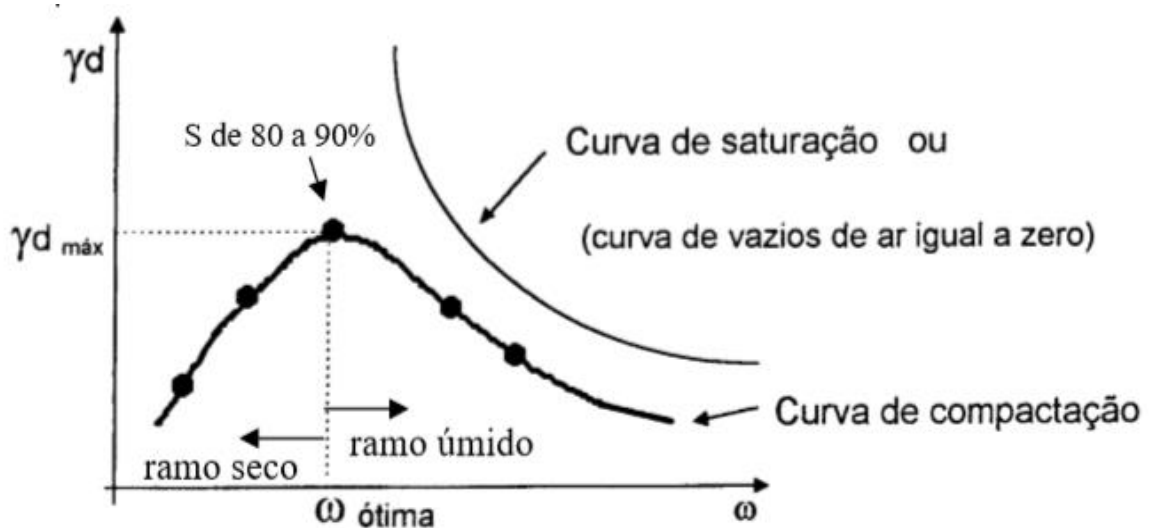
Ainda segundo Franceschet (2006), para investigar a influência destes fatores nas propriedades mecânicas dos solos compactados podem-se moldar vários corpos de prova com diferentes teores de umidade e densidade, aplicando energias de compactação apropriadas para cada situação. A curva de compactação do ensaio é representada através de um gráfico da densidade seca em função da umidade. Assim pode-se verificar como a umidade e a densidade influenciam na característica de compactação.

A compactação do solo é uma forma para conter a percolação do chorume, para que o mesmo não atinja as águas dos aquíferos, assim quando se atinge uma baixa permeabilidade (HAMADA, 2002). As técnicas de compactação são definidas pelo lançamento de material de empréstimo proveniente de jazidas, ou do próprio local (reenchimentos) e passagens de equipamentos que aplique uma certa energia para compactação, sendo cargas moveis e/ou estática (BASTOS, 2015).

Segundo Hamada (2002), a compactação de solo para construção de aterros sanitários, em solos arenosos, é de uma forma um tanto complicado para que se prepare o mesmo, uma vez que, o processo exige uma redução da permeabilidade, a fim de minimizar a infiltração de líquidos. Portanto, para tal finalidade devem-se conhecer os processos de movimentação do chorume, principalmente nas camadas iniciais da base do aterro.

Segundo Basto (2015), quando se aplica uma mesma energia de compactação em um determinado solo com diferentes valores de teor de umidade obtêm-se o seguinte gráfico (figura 2):

Figura 2: Curvas de Compactação.



Fonte: BASTO, (2015).

De acordo com o autor o baixo teor de umidade favorece o atrito entre as partículas dificultando a compactação, porém ao aumentar o teor de umidade a compactação do solo a facilidade até atingir a umidade ótima.

Ritter (2002), realizou ensaios de permeabilidades de carga variável com amostras de solo compactadas no ramo seco e no úmido da curva de compactação. Os resultados indicaram valores de permeabilidade no ramo úmido da curva de compactação cerca de 40 % menor que no ramo seco. Com base neste resultado o autor recomenda que, no campo, o material seja sempre compactado no ramo úmido da curva de compactação, pois nesta situação a permeabilidade é menor.

2.5 IMPACTOS AMBIENTAIS

Entre os impactos ambientais negativos que podem ser originados a partir do lixo urbano produzido estão os efeitos decorrentes da prática de disposição inadequada de resíduos sólidos em fundos de vale, às margens de ruas, cursos d'água, ou diretamente no solo. Essas práticas habituais podem provocar, entre outras coisas, contaminação dos recursos hídricos, contaminação do solo, assoreamento, enchentes, proliferação de vetores transmissores de doenças, além disso a poluição visual, mau cheiro e contaminação do ambiente (PEREIRA, 2007).

A decomposição dos resíduos sólidos gera o chorume, líquido que pode conter altas concentrações de sólidos suspensos, metais pesados (mercúrio, chumbo, entre outros), compostos orgânicos originados da degradação de substâncias que facilmente são metabolizadas como carboidratos, proteínas e gorduras. Por apresentar substâncias altamente solúveis, o chorume pode contaminar as águas do subsolo nas proximidades do aterro e o próprio solo (COSTA et al., 2007).

Dentre os problemas ambientais que enterram no cenário público internacional, a partir da década de 70, um dos que mais vem sendo destacado é a crescente poluição química com metais pesados. A questão dos resíduos sólidos gerados pela sociedade atual encontra-se num limiar que tem obrigado, não apenas as autoridades sanitárias e ambientais, mais também a população, a buscar soluções alternativas para um gerenciamento que atenda às recomendações técnicas e legais, em função dos riscos à saúde pública e ao meio ambiente (OLIVEIRA, 2007).

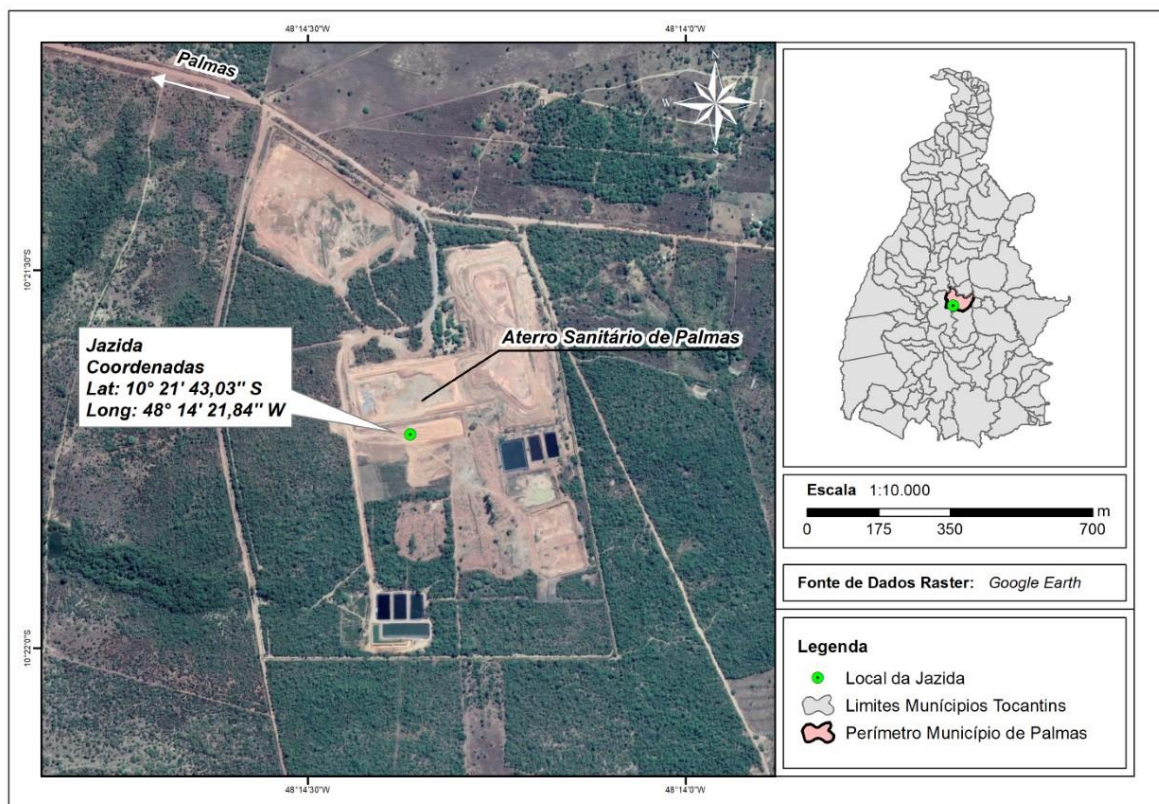
Na fase metanogênica de estabilização da matéria orgânica presente no lixo, ocorre a produção de metano que tem um decréscimo após o empobrecimento do conjunto de substratos solúveis. A matéria orgânica, fracamente biodegradável passa por um lento processo de metabolização, formando moléculas complexas de alta massa molar. A emissão do gás na atmosfera polui o ar e contribui para o efeito estufa (PEREIRA, 2007).

Implantações como o aterro sustentável, asseguram uma melhoria na saúde da comunidade e minimiza impactos negativos associados ao manejo e disposição inadequada do RSU. A execução deste sistema permite a captação do chorume, do gás metano, além de confinar a camada de lixo de forma segura, assegurando a minimização dos impactos socioambientais.

3. METODOLOGIA

O solo utilizado para realização dessa pesquisa qualitativa foi coletado no dia 23/08/2018 no aterro sanitário da cidade de Palmas-TO. As coordenadas geográficas locais de referência são $10^{\circ}21'43.03''$ S de latitude, $48^{\circ}14'21.84''$ O de longitude, e altitude de 260 m, apresentado na figura 3. Vale ressaltar que a coleta das amostras foi feita na jazida da célula em ativa, cujo material retirado é utilizado para realizar a impermeabilização das camadas base e de cobertura da vala.

Figura 3- Localização do Aterro Sanitário de Palmas-TO.



Fonte: Autor, 2018.

As análises laboratoriais, foram realizadas no laboratório de solos do Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA) e os ensaios executados foram essenciais para caracterização física do solo, posteriormente determinar o grau de compactação bem como determinar a condutividade hidráulica através do mesmo.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO NATURAL

A preparação de amostras foi feita de acordo com o especificado pela NBR 6457/86, pois está prescreve o método de preparação de amostras de solo necessário para realizar os ensaios de caracterização do solo e compactação.

Para os demais ensaios segui o recomendado pelas normas:

- Análise Granulometria - NBR 7181 (ABNT, 2016).
- Massa Específica dos Grãos - NBR 6508 (ABNT, 1984).
- Limite de Liquidez - NBR 6459 (ABNT, 2016).
- Limite de plasticidade - NBR 7180 (ABNT, 2016).
- Compactação - NBR 7182 (ABNT, 2016).
- Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável - NBR14545 (ABNT, 2000).

3.1.1 Ensaio de granulométrica

Este ensaio tem como objetivo determinar o percentual de material retido em cada peneira de acordo com a malha. Primeiramente realizou-se o peneiramento de 1kg da amostra de solo, após este procedimento foi realizado a pesagem do material retido em cada malha, exceto o material da peneira de número 200, pois este foi submetido a lavagem para retirada do material pulverulento (figura 4), o restante do material que permaneceu na peneira foi submetido a estufa de ventilação forçada a uma temperatura aproximada de 110 °C, por 24 horas, por fim realizou-se a pesagem do material.

Figura 4- Lavagem do material pulverulento.



Fonte: Autor, 2018.

3.1.2 Determinação da Massa Específica dos Grãos

Para realização deste ensaio retirou-se 50g do material passante na peneira de número 4.8 e em seguida o adicionou-se em um picnômetro com água destilada. Para retirada do ar

presente no aparelho foi necessário a realização do banho maria (figura 5). Por fim realizou-se a pesagem do material (Picnômetro + Solo + Água).

Figura 5- Picnômetro com solo e água.



Fonte: Autor, 2018.

3.1.3 Avaliação do Limite de Liquidez (LL)

Para determinar o comportamento plástico do solo fez-se a realização do ensaio de limite de liquidez. Experimentalmente corresponde ao teor de umidade com que o solo fecha certa ranhura sob o impacto de até 40 golpes do aparelho de Casagrande. São feitas várias tentativas, com diferentes níveis de umidade, onde a ranhura se fecha com diferentes números de golpes.

Feito a homogeneização da amostra com água, adiciona-se uma parcela na concha do aparelho Casagrande com auxílio de uma espátula, posteriormente no meio da massa faz-se com o cinzel uma ranhura no sentido do maior comprimento do aparelho (figura 6). Inicia-se os golpes fazendo a contagem do número necessários para o fechamento da ranhura.

Figura 6- Limite de Liquidez



Fonte: Autor, 2018.

3.1.4 Avaliação do Limite de Plasticidade (LP)

Este ensaio é tido como o teor de umidade em que o solo deixa de ser plástico, tornando-se quebradiço, é a umidade de transição entre os estados plástico e semissólido do solo. A metodologia consiste em adicionar o solo em uma capsula e posteriormente adicionar água destilada até que o solo permita ser moldado (figura 7ab). Em seguida molda-se certa quantidade da massa em forma elipsoidal rolando-a sobre a placa de vidro para que ocorra perda de umidade para a placa, até que fissure em pequenos fragmentos quando essa atingir dimensões de 3mm de diâmetro e 10cm de comprimento.

Figura 7- Limite de Plasticidade (a)



Moldagem do corpo de Prova(b).



Fonte: Autor, 2018.

O corpo de prova é condicionado a estufa de ventilação forçada para determinar o teor de umidade no qual o solo apresenta-se fissuras.

3.2 COMPACTAÇÃO DO SOLO

O ensaio visa determinar a relação entre o teor de umidade ($w\%$) e a massa específica aparente seca de solos (γ_d) quando compactados. Todo ensaio foi executado pela metodologia do Proctor Normal, utilizando o soquete com peso de 2,5 kg.

Primeiramente adiciona-se água à amostra até se verificar uma certa consistência que permita a perfeita homogeneização da amostra, posteriormente realiza a compactação da amostra no molde cilíndrico em 5 camadas iguais (cada uma cobrindo aproximadamente um quinto do molde), aplicando-se em cada uma delas 12 golpes distribuídos uniformemente sobre a superfície da camada, com o soquete. Após este procedimento remove-se o colarinho e a base,

aplana-se a superfície do material à altura do molde (figura 8) e pesa-se o conjunto cilindro + solo úmido compactado.

Figura 8- Ensaio de Compactação.



Fonte: Autor, 2018.

Para determinação do teor de umidade retira-se uma pequena quantidade de amostra adicionando em capsulas e submetendo a estufa com temperatura próxima de 110°C. Para as amostras seguintes acrescenta-se água numa quantidade da ordem de 2% da massa original de solo, em peso. Repete-se o processo pelo menos mais quatro vezes.

3.3 EXPERIMENTOS DE FLUXO ATRAVÉS DE PERMEÂMETROS COM CARGA HIDRÁULICA VARIÁVEL;

Este ensaio é composto por duas etapas: saturação e ensaio de permeabilidade.

- **Etapa de saturação:** a saturação do corpo de prova deve ser realizada para a retirada do ar dos vazios existentes no solo. O fluxo, segundo recomendações da norma, deve ser ascendente, permitindo a saída do ar;
- **Etapa de permeabilidade:** após a saturação muda-se o sentido de fluxo e realiza-se o ensaio da permeabilidade.

A figura 9(a) esquematiza a preparação do corpo de prova para realização do ensaio, na qual utilizou-se a parafina para vedar o espaço entre o corpo de prova e a parede do permeâmetro. O piloto experimental de fluxo, composto pelo permeâmetro, está apresentado na figura 9(b). Observa-se o fluxo descendente do líquido percolado, processo monitorado por um período 150 minutos.

Figura 9- Corpo de Prova (a) Ensaio de permeabilidade (b)



Fonte: Autor, 2018.

O líquido percolado foi armazenado em um reservatório superior, com uma carga hidráulica de 1,00 m. O fluxo foi contínuo sobre o solo, sendo que o coeficiente de permeabilidade foi aferido aproximadamente a cada 30 minutos. Para obtenção dos dados marcou-se o tempo inicial, a leitura inicial, o nível de saída e a temperatura.

O coeficiente de permeabilidade (k) foi calculado conforme a Equação:

$$k = 2,3 \frac{a \times H}{A \times \Delta t} \log \frac{h_1}{h_2}$$

Onde:

k = coeficiente de permeabilidade (cm/s);

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

H = altura inicial do corpo-de-prova (cm);

A = área do corpo-de-prova (cm²);

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

h_1 = carga hidráulica no instante t_1 (cm);

h_2 = carga hidráulica no instante t_2 (cm).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Neste item, serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização, tradicionalmente usados na mecânica dos solos e que consistem basicamente de granulometria e limites de consistência, visando à identificação do solo através de um sistema de classificação.

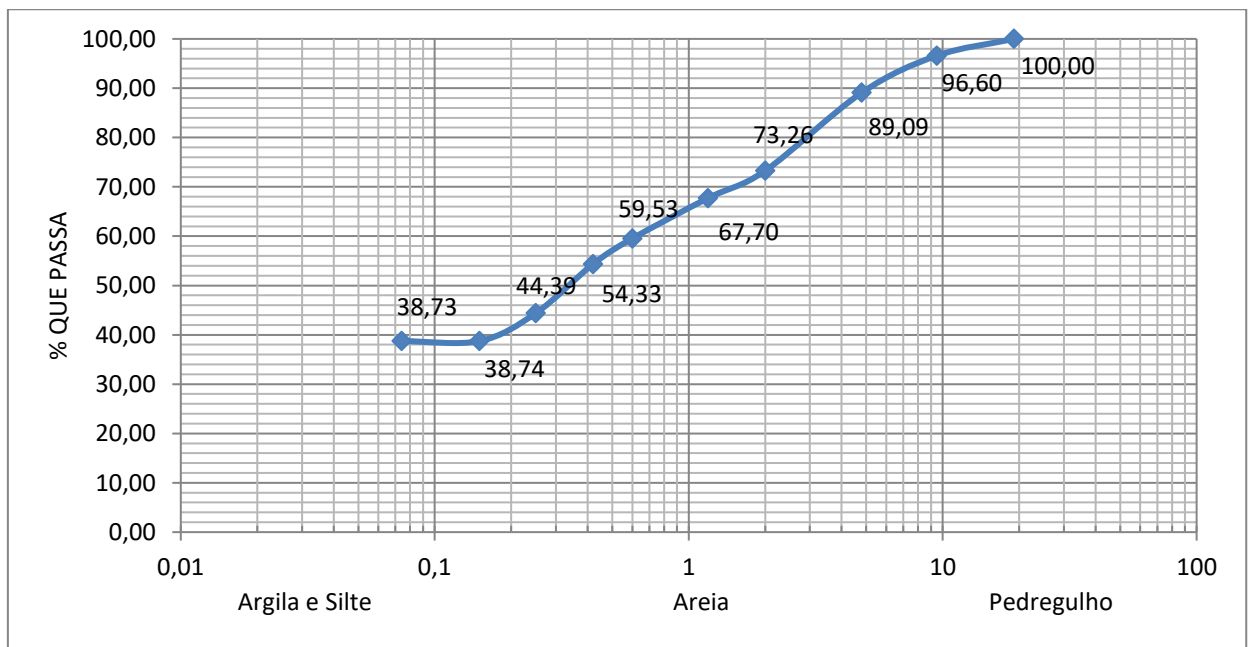
O ensaio de granulometria, evidenciou que o mesmo apresenta alto percentual de material fino, ou seja, 50,37 % do material tem essa classificação, do restante, 38,73 % e passante na peneira de nº 200, diâmetro menor que 0,075mm, e somente 10,91% é de material grosso. A tabela 1 apresenta o percentual passante em cada número de peneira, e a figura 10 exibe curva granulométrica.

Tabela 1 - Análise Granulométrica- NBR 7181

PENEIRA	3/4"	3/8"	Nº 4	Nº 10	Nº 16	Nº 30	Nº 40	Nº 50	Nº 100	Nº 200
% PASSANTE	100	96,6	89,09	73,26	67,7	59,53	54,33	44,39	38,74	38,73

Fonte: Autor, 2018.

Figura 10- Curva de Granulometria.



Fonte: Autor, 2018.

Conforme os dados de granulometria, o solo pode ser classificado como bem graduado, uma vez que, há existência de grãos com diversos diâmetros. Em geral, essas características

favorecem um melhor comportamento sob o ponto de vista da engenharia, pois, as partículas menores ocupam os vazios correspondentes às maiores, criando um entrosamento, do qual resulta menor compressibilidade e maior resistência, além disso favorece a redução no número de vazios, resultando em uma menor permeabilidade.

Na tabela 2, pode-se observar que o valor da massa específica dos grãos do solo é de 2,62 g/cm³, característica de solos argilosos. Ainda na tabela são apresentados os limites de Atterberg e o índice de plasticidade (IP) que é de 10,2 %. Segundo Caputo (1988) esse solo é classificado como mediantemente plástico.

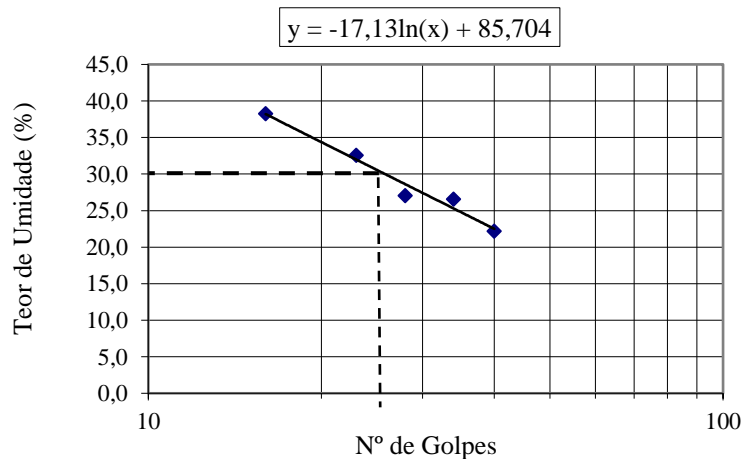
Tabela 2 - Índice de Atterberg

Características do Solo			
ρ_s (g/cm ³)	LL (%)	LP (%)	Ip(%)
2,62	30	19,8	10,2

Fonte: Autor, 2018.

A figura 11 apresenta graficamente o teor de umidade com que o solo fecha certa ranhura sob o impacto de 25 golpes do aparelho de Casagrande.

Figura 11- Limite de Liquidez



Fonte: Autor, 2018.

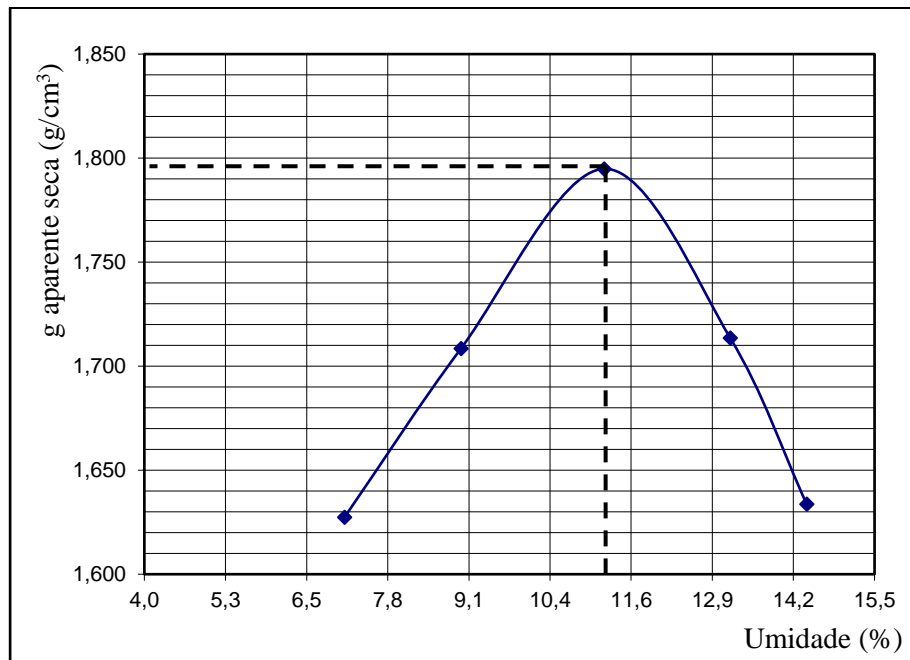
Conforme os dados de caracterização, o material analisado possui elevados teores de finos, com limite de liquidez (LL) < 50%. De acordo com o sistema unificado de classificação de solos para propósito de engenharia (ASTM, 1983), baseando nos limites de Atterberg e em

dados da granulometria, esse material é classificado dentro do universo dos solos finos, grupo MH, sendo designados como argila pouco plástica.

4.2 COMPACTAÇÃO DO SOLO

Os resultados do ensaio por compactação com energia do Proctor Normal são apresentados na figura 12, na qual estão indicados os pontos correspondentes à umidade ótima e massa específica seca máxima. A curva apresenta uma pequena variação no valor da massa específica para uma grande variação de umidade, sendo, portanto, uma curva típica de solos argilosos.

Figura 12- Curva de Compactação.



Fonte: Autor, 2018.

Ainda sobre a curva de compactação pode-se observar que à umidade ótima obtida no ensaio foi de 11,2 % e a massa específica aparente máxima do solo seco foi de 1,795 g/cm³.

4.3 PERMEABILIDADE DO SOLO

A seguir, na tabela 3, serão apresentados os resultados do ensaio de permeabilidade à água para o solo utilizado nas camadas de base e cobertura do aterro Sanitário de Palmas. A permeabilidade é um parâmetro importante para a análise do comportamento dessas camadas no que diz respeito à infiltração de água através da camada de cobertura que vai influenciar na geração de lixiviado possibilitando a contaminação do solo e da água subterrânea.

Tabela 3- Permeabilidade do Solo no Ramo Úmido

Período Minutos	K _{méd} [cm/s]
	Ramo Úmido
5	-
30	4,40E-06
60	3,63E-06
90	3,29E-06
120	3,11E-06
150	3,05E-06

Fonte: Autor 2018.

O coeficiente de condutividade hidráulica (K) do solo na pior situação foi 4.40×10^{-6} , quando compactado na umidade ótima (11,2 %). A Tabela 3 mostra a variação do coeficiente de permeabilidade em função do tempo. Observa-se que a permeabilidade do solo diminuiu durante o período de monitoramento, sendo inicialmente em torno de $4,40.10^{-6}$ cm/s e no final em torno de $3,05.10^{-6}$ cm/s, isto pode estar ocorrendo devido a colmatção dos vazios.

Este solo não é recomendado para utilização de impermeabilização da camada base e cobertura final, uma vez que, este é classificado como um solo de baixa permeabilidade. Os solos impermeáveis apresentam coeficiente de permeabilidade menor que 10^{-7} cm/s segundo a NBR 13292/95.

De acordo com Franceschet (2006), ao avaliar um solo silte-arenoso, com características 47,01% de silte, 27,55% de areia e 25,43% argila, o coeficiente de permeabilidade desde foi em torno de $4,8.10^{-6}$ cm/s.

É importante lembrar que o solo utilizado para impermeabilização da base e cobertura no aterro é o mesmo, porém, o que garante a segurança de todo o sistema é a impermeabilização da camada base com mantas em Polietileno de Alta Densidade (PEAD), com espessura de 2 mm.

De acordo com as normativas e a análise da permeabilidade do solo, é possível afirmar que este é ideal para o cobrimento diário e intermediário, pois favorece a percolação do chorume até o sistema de captação. Além disso segundo Alcantra (2010) devido a colmatção dos vazios ocorrida pelas partículas sólidas em suspensão existentes no líquido percolado (chorume), o solo apresentara menor permeabilidade do que o valor encontrado para a água, tornando-se este adequado para impermeabilização da camada mencionada.

4.4 SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO

A escolha dos materiais utilizados para formar um sistema de impermeabilização em aterros sanitários varia de acordo com a influência do meio ambiente físico, pela química da solução percoladora, pela vida útil de projeto, taxa de infiltração e restrições físicas. Neste item o objetivo é sugerir um sistema voltado para a restrição do meio ambiente físico (permeabilidade do solo).

Geralmente a impermeabilização em aterros utiliza-se da combinação das duas barreiras (solo compactado + geomembranas) o que favorece uma maior segurança caso ocorra algum defeito que possa apresentar e resultar em grandes fluxos de percolação (REBELO, 2009). Especificamente em aterros de resíduos, as geomembranas de PEAD são as mais utilizadas devido à sua resistência química, mecânica, e durabilidade, além de permitirem soldas resistentes do ponto de vista mecânico e hidráulico (LOPES, 2006).

Em especial para o aterro sanitário de palmas, sugiro que a impermeabilização da camada base das valas continue sendo feita com manta em PEAD, com espessura de 2mm (condutividade hidráulica da ordem de 10^{-12} (cm/s), pois garantiria maior segurança para todo sistema. Se o solo analisado apresentasse permeabilidade inferior ao recomendado por norma que é menor que 10^{-7} cm/s, poderia fazer uso de uma manta com menor espessura ou até mesmo de um outro material (PVC), o que reduziria os custos de implantação, uma vez que possui um custo menor por m^2 .

Com relação a camada de cobertura, o solo apresenta característica de permeabilidade ideais para o cobrimento diário e intermediário, porém para o cobrimento final, seria ideal o uso de um solo que garanta uma condutividade hidráulica da ordem de 10^{-7} à 10^{-8} cm/s. A NBR 13896/97, exige que essa impermeabilização seja feita com solos impermeáveis.

5. CONCLUSÕES

Com base nos dados obtidos e nas condições específicas em que este trabalho foi conduzido, verificou-se a importância de estudar os solos que são utilizados como materiais para impermeabilização de aterros sanitários, seja ele utilizado unicamente ou até mesmo com a combinação de outro sistema.

O sistema de impermeabilização é dependente do bom funcionamento das duas camadas, gerando a necessidade de se atentar para o tipo de solo utilizado na camada de cobertura, idealizando solos impermeáveis, pois quanto mais impermeável for, menor será a quantidade de água que irá infiltrar nas células do aterro, e com isso, menor será o volume de líquido percolado gerado.

Neste estudo observou-se que o solo utilizado como material de impermeabilização para a base e cobertura no aterro sanitário de Palmas, não deveria ser o mesmo, uma vez que não atendeu o coeficiente de permeabilidade exigido por norma para a camada base que é de 10^{-7} cm/s, o coeficiente encontrado foi em torno de $4,40 \cdot 10^{-6}$ cm/s. O solo se mostrou ideal para impermeabilização da camada de cobertura diária é intermediária.

Recomenda-se que para as próximas células a ser impermeabilizadas continue-se utilizando de geomembranas PEAD, de espessura igual ou superior a 2mm, para garantir a estanqueidade do sistema.

- Sugestões para novas pesquisas

Analisar a permeabilidade de outro tipo de solo, com um percentual de argila maior que o deste trabalho, para possível indicação ao aterro.

Caso seja possível, avaliar o grau de compactação do solo usado na compactação da camada base da próxima célula, uma vez que, o material deve ser coletado no período de implantação da mesma.

Realizar um estudo, para avaliar uma possível contaminação dos recursos naturais próximo ao aterro com metais pesados, oriundos da lixiviação do chorume.

6. REFERÊNCIAS

_____. **NBR 6457**: Amostra de Solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

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

_____. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 8419**: Aterro Sanitário - Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 13292**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 13896**: Aterro Sanitário - Aterros de resíduos não perigosos Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997.

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

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil- 2016. São Paulo: **Abrelpe**, 2016. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2016-07/producao-de-lixo-no-pais-cresce-29-em-11-anos-mostra-pesquisa-da-abrelpe>. Acesso em: 15 abril. 2018.

ALCANTARA, A. J. O. **Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos e caracterização química do solo da área de disposição final do município de Cáceres-MT**. Dissertação (Programa de pósgraduação em Ciências Ambientais), Universidade do Estado do Mato Grosso. Cáceres, 2010. 89 p.

BASTOS, C. Compactação dos solos, DMC/FURG. Mecânica dos Solos. Prof. Cezar Bastos p. 001. 2015. Disponível em: <ftp://ftp.ifes.edu.br/cursos/Transportes/CelioDavilla/Solos/Literatura%20complementar/Apostila%20FURG%20Solos/07-%20COMPACTACAO.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2018.

CAPUTO, H. P., **Mecânica dos Solos e suas aplicações**. 6. ed. rev. Rio de Janeiro: LTC, 1988. 1 v.

COSTA, F.C.; RODRIGUES, F. S. M.; FONTOURA, G. T.; CAMPOS, J. C.; SANTÁNA J.R.; DEZZOTI, M. **Tratamento do efluente de uma indústria química pelo processo de lodos ativados convencional e combinado com carvão ativado.** Engenharia Sanitária e Ambiental. V. 8, (4), p.274-284, 2003.

DAS, B. M., **Fundamentos de engenharia geotécnica.** São Paulo: Thomson Learning, 2007.

FAGUNDES, D. C., Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos em Tarumã e Teodoro Sampaio – SP. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, p. 159-179, 2009.

FERRI, G. L.; CHAVES, G. L. D.; RIBEIRO, G. M., **Análise e localização de centros de armazenamento e triagem de resíduos sólidos urbanos para a rede de logística reversa: um estudo de caso no município de São Mateus.** Espírito Santo. Production, 2013.

FRANCESCHET, M. **Estudo dos Solos Utilizados para Impermeabilizar Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos de Santa Catarina.** Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006. 157 p.

GOMES, L. P.; MARTINS, F. B., Projeto, Implantação e Operação de Aterros Sustentáveis de Resíduos Sólidos Urbanos para Municípios de Pequeno Porte. **Resíduos Sólidos Urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte.** Rio de Janeiro: RIMA/ABES, 2003.

HAMADA, J., Escoamento de chorume de aterros sanitários em solos arenosos compactados. **XXVIII Congresso Interamericano de Engenheiros Ambientais e Sanitaristas**, Cancun, México, 2002 p. 1-7.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**, 2008, p. 59-60, Rio de Janeiro, 2010.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado. D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. (Coord.) 2. ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000.

LOPES, L. F., **Análise dos métodos de controle de integridade de geomembranas de PEAD usadas em aterros de RSU.** Revista Geotecnia, 2006 p. 107-131.

MASSUKADO, L. M., Sistema de apoio à decisão: **Avaliação de cenários de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos domiciliares.** Dissertação (Engenharia Urbana)- Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2006.

MIGUEL, M. G.; ALBUQUERQUE, P. J. R.; SAUEIA, F. N.; BENATTI, J. C. B.; MARQUE, R.; HAJNAL, V. H. J., Aspectos Geológico-Geotécnicos da Camada de Solo Argiloso, Laterítico e Coluvionar de Campinas/SP In: **III Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos do Centro-Oeste e Norte.** Cuiabá/MT: CEFET/MT, 2007. v.1.

OBLADEN, N. L.; BARROS, K. R. Guia para elaboração de projetos de aterros sanitários para resíduos sólidos urbanos. **CREA-PR**, v. 2, p. 64, 2009.

OLIVEIRA, D. L. **Influência do aterro municipal de Manaus nas águas superficiais da circunvizinhança: um enfoque ao estudo de metais pesados**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2007. 157 p.

PEREIRA, S. S.; MELO, J. A. B. Análise do impacto sócio-ambiental causado pela má gestão dos resíduos sólidos urbanos na cidade de Campina Grande/PB. **1º Simpósio Nordestino sobre Resíduos Sólidos – Gestão e Tecnologia de Reciclagem**. Centro de Convenções Raimundo Asfora – Campina Grande – PB. Março de 2007.

PINTO, C. S. Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2000.

REIS, M. F. P., ELLWANGER, R. M., Metais Pesados em Compostos de Resíduos Sólidos Urbanos. **SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL**, 4, 2004, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: 2004.

REBELO, K. M. W., Resistência da interface entre geomembranas e solos através de ensaio de ring shear. Universidade Federal do Espírito Santo, 4, 2003. **ResearchGate...**, Nov 23, 2007.

REBELO, K. M. W., **Avaliação de Camadas de Proteção para Geomembranas de PVC e PEAD**. Tese de Doutorado em Geotecnia. Universidade de São Paulo (Escola de Engenharia de São Carlos). São Carlos, 2009. 267 p.

RITTER, E. Avaliação da Permeabilidade da barreira de proteção da fundação do aterro sanitário de Piraí. In: **SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**, 6, 2002, Vitória. **Anais...**Rio de Janeiro: ABES, 2002.

SOARES, L. M. P., **Influência de diferentes doses de compostos produzidos no sistema de tratamento descentralizado de resíduos sólidos orgânicos domiciliares para o desenvolvimento de tomateiro**. Monografia de Licenciatura Plena em Ciências Biológicas da Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande/PB, 2012. 63f.

APÊNDICES

- **Granulometria**

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA -NBR-7181				
PENEIRA	DIAMETRO (mm)	RETIDO (g)	PASSANTE (g)	% PASSANTE
2"	50,8	-	-	-
1 1/2"	38,1	-	-	-
1"	25,4	-	-	-
3/4"	19	-	-	-
3/8"	9,5	34	966	96,6
Nº 4	4,8	75,1	890,9	89,09
Nº 10	2	158,3	732,6	73,26
Nº 16	1,19	55,6	677	67,7
Nº 30	0,59	81,7	595,3	59,53
Nº 40	0,42	52	543,3	54,33
Nº 50	0,25	99,4	443,9	44,39
Nº 100	0,15	56,5	387,4	38,74
Nº 200	0,075	0,1	387,3	38,73

- **Massa específica**

MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS		
Picnômetro Nº	1	2
Pic +Solo+Água (g)	666,7	658,9
Pic + Água (g)	635,8	627,9
T°C de Ensaio	26	26
Massa do Úmido (g)		
Massa do Seco (g)	50	50
ME da Água, T°C Ens	0,99681	0,99681
ME dos Grãos	2,618	2,617
ME dos Grãos média	2,62	

- **Limite de Líquides**

LIMITE DE LIQUIDEZ - NBR-6459						
Determinação	#	1	2	3	4	5
Cápsula	#	1	2	3	4	7
Massa Solo Úmido + Cápsula	(g)	51,40	47,40	48,20	44,30	44,40
Massa Solo Seco + Cápsula	(g)	45,50	41,40	41,60	37,40	35,30
Massa da Cápsula	(g)	18,90	18,80	17,20	16,20	11,50
Massa da Água	(g)	5,90	6,00	6,60	6,90	9,10
Massa Solo Seco	(g)	26,60	22,60	24,40	21,20	23,80
Teor de Umidade	(%)	22,18	26,55	27,05	32,55	38,24
Número de Golpes	#	40	34	28	23	16

- Limite de Plasticidade

LIMITE DE PLASTICIDADE - NBR-7180						
Determinação	#	1	2	3	4	5
Cápsula	#	3	4	6	18	24
Massa Solo Úmido + Cápsula	(g)	10,55	10,40	10,00	10,10	9,80
Massa Solo Seco + Cápsula	(g)	10,35	10,18	9,78	9,86	9,55
Massa da Cápsula	(g)	9,40	9,12	8,66	8,62	8,26
Massa da Água	(g)	0,20	0,22	0,22	0,24	0,25
Massa Solo Seco	(g)	0,95	1,06	1,12	1,24	1,29
Teor de Umidade	(%)	21,05	20,75	19,64	19,35	19,38

CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO DA MÉDIA (\bar{L}_P)				
#	\bar{L}_P	$0,95\bar{L}_P$	$1,05\bar{L}_P$	\tilde{N} Serve
1	20,04	19,04	21,04	1
2	19,78	18,79	20,77	

LL = A.ln(Nº de Golpes) + B	
A	-17,13
B	85,704

Limite de Liquidez (LL)	30,0
Limite de Plasticidade (LP)	19,8
Índice de Plasticidade (IP)	10,2

- Permeabilidade

ENSAIO DE PERMEABILIDADE- NBR-14545

Dimensões corpo de prova	
Diâmetro(cm)	9,9
Altura (cm)	9,8
Área (cm)	76,94
Peso do solo (g)	1523

Tubo de vidro	
diâmetro (cm)	0,39
área (cm ²)	0,12

$$k = 2,3 \frac{a \times H}{A \times \Delta t} \log \frac{h_1}{h_2}$$

Nível da mangueira (cm)	97
-------------------------	----

Tempo(min)	Tempo (s)	Leitura(cm)	Carga Hidráulica(cm)	K(cm/s)
5	300	40	57	-
30	1800	60	37	4,40E-06
60	3600	71	26	3,63E-06

90	5400	78	19	3,29E-06
120	7200	83	14	3,11E-06
150	9000	87	10	3,05E-06