

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DE UM SOLO TROPICAL PARA O USO EM  
CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS  
UTILIZANDO A METODOLOGIA DE DANIEL & WU**

**VITOR FEITOSA PEREIRA**

**ORIENTADORA: PROF<sup>a</sup>. CLÁUDIA MARCIA C. GURJÃO**  
**CO ORIENTADOR: PROF. LUIS FERNANDO M. RIBEIRO**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA  
CIVIL**

**BRASÍLIA-DF: JULHO/2016**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DE UM SOLO TROPICAL PARA O USO EM  
CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS  
UTILIZANDO A METODOLOGIA DE DANIEL & WU**

**VITOR FEITOSA PEREIRA**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

**APROVADA POR:**

---

**CLÁUDIA MARCIA COUTINHO GURJÃO, DSc. (UnB)**  
**(ORIENTADOR)**

---

**LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc. (UnB)**  
**(CO-ORIENTADOR)**

---

**HERNÁN EDUARDO MARTÍNEZ CARVAJAL, DSc. (UnB)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**ELEUDO ESTEVES DE ARAUJO SILVA JUNIOR, MSc. (UnB)**  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 6 de julho de 2016.**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

PEREIRA, VITOR FEITOSA

Avaliação de um Solo Tropical para o Uso em Camadas de Cobertura de Aterros Sanitários Utilizando a Metodologia de Daniel & Wu.

[Distrito Federal] 2016.

xi, 57 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2016)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- |                       |                   |
|-----------------------|-------------------|
| 1. Solos Tropicais    | 2. Compactação    |
| 3. Aterros Sanitários | 4. Permeabilidade |

I. ENC/FT/UnB

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

PEREIRA, V.F. (2016). Avaliação de um Solo Tropical para o Uso em Camadas de Cobertura de Aterros Sanitários Utilizando a Metodologia de Daniel & Wu. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 57 p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Vitor Feitosa Pereira

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação de um Solo Tropical para o Uso em Camadas de Cobertura de Aterros Sanitários Utilizando a Metodologia de Daniel & Wu.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2016

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Vitor Feitosa Pereira

Quadra 42 Casa 05 Setor Leste

72465-420–Gama-DF – Brasil

## RESUMO

A crescente preocupação com o meio ambiente tem feito a sociedade pensar em modos de diminuir os impactos ambientais e um dos pontos importantes refere-se à correta disposição dos resíduos sólidos. Existem diferentes modos de disposição, mas os que têm sido mais viáveis são os aterros sanitários, por apresentar melhor controle construtivo e menores impactos ambientais. O governo brasileiro, através do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, instituiu que todos lixões e aterros controlados deverão ser desativados, impondo de forma sistemática a construção de novos aterros sanitários. Para que as vantagens ambientais dos aterros existam é necessário que a escolha do solo que vai compor a sua estrutura de contenção e impermeabilização seja adequada. Portanto, neste trabalho foi feita a análise do solo, que se localiza na área onde está sendo implantado o atual aterro sanitário do DF, como elemento constituinte da camada de cobertura deste aterro. Uma das principais funções das camadas de cobertura é impedir a penetração de água para dentro das células do aterro. Neste sentido é importante que estas estruturas sejam constituídas de solos compactados que possam assegurar a sua baixa permeabilidade e dificulte a infiltração da água da chuva ao resíduo e impeça um aumento na geração e percolação de líquidos tóxicos, provenientes da decomposição do resíduo, para o solo de fundação e águas subterrâneas. A metodologia que foi adotada neste trabalho para avaliação do comportamento dos solos tropicais foi proposta por Daniel & Wu (1993), em que se estabelece valores mínimos de condutividade hidráulica, resistência a compressão e contração volumétrica que possam garantir ao solo compactado uma baixa permeabilidade. Para aplicação desta metodologia foram realizados ensaios de caracterização, compactação, permeabilidade, compressão simples e contração volumétrica. Um ponto importante a respeito destes ensaios refere-se à aplicabilidade da metodologia MCT (Miniatura Compactada Tropical) no contexto da metodologia proposta por Daniel e Wu (1993). Os resultados obtidos, além de validar a aplicabilidade dos solos tropicais nas camadas de cobertura de aterros sanitários, poderão habilitar a utilização da metodologia MCT neste tipo de análise. Neste trabalho conclui-se que a metodologia MCT permite de maneira satisfatória obter os parâmetros necessários para a avaliação do solo a ser usado como camada de cobertura. O solo estudado não conseguiu atender a todos os critérios estabelecidos por Daniel & Wu nas diferentes energias em que foi compactado, obtendo um melhor desempenho para a compactação na energia modificada.

# SUMÁRIO

RESUMO .....	iv
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	x
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....	1
1.1 INTRODUÇÃO .....	1
1.2 OBJETIVO DO TRABALHO .....	2
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	3
2.2 PROBLEMAS COM OS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) .....	3
2.3 LEI DA POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	6
2.4 ATERROS SANITÁRIOS .....	7
2.4.1 CAMADA DE COBERTURA .....	9
2.5 SOLOS .....	17
2.5.1 SOLOS LATERÍTICOS .....	18
2.5.2 SOLOS NÃO LATERÍTICOS .....	18
2.6 CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS .....	19
2.6.1 METODOLOGIA MCT .....	19
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA DO PROJETO .....	23
3.1 MATERIAL UTILIZADO .....	23
3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	24
3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS .....	24
3.2.2 ENSAIO MINI-MCV E ENSAIO DE PERDA DE MASSA POR IMERSÃO .....	24
3.3 ENSAIOS DE PROPIEDADES MECÂNICAS E HIDRÁULICAS .....	26
3.3.1 ENSAIO DE MINI-PROCTOR .....	26
3.3.2 ENSAIO DE PERMEABILIDADE .....	28
3.3.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	28
3.3.4 ENSAIO DE RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA .....	29

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS .....	30
4.1 CARACTERIZAÇÃO .....	30
4.2 CLASSIFICAÇÃO MCT .....	32
4.3 COMPACTAÇÃO.....	35
4.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS E HIDRÁULICAS.....	36
4.4.1 PERMEABILIDADE .....	37
4.4.2 RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA .....	39
4.4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	42
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....	45
5.1 RECOMENDAÇÕES GERAIS .....	45
5.2 METODOLOGIA DE DANIEL & WU.....	45
5.3 METODOLOGIA MCT .....	46

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Comparativo entre a geração de RSU em t/ano e em kg/hab/ano nos anos de 2013 e 2014 (ABRELPE, 2014).....	4
Figura 2.2 - Comparativo entre a destinação final de RSU em t/ano nos anos de 2013 e 2014 (ABRELPE, 2014).....	5
Figura 2.3 - Disposição de resíduos sólidos no Distrito Federal (ABRELPE, 2014).....	6
Figura 2.4 - Aterro Sanitário (GODOY, 2007 <i>apud</i> PIEDADE JR., 2003).....	9
Figura 2.5 - Variação da Condutividade hidráulica com o Teor de umidade. DANIEL (1984).....	12
Figura 2.6 - Recomendações de projeto: (a) determinação da curva de compactação com o Proctor Modificado, Normal e Reduzido; b) determinação da condutividade hidráulica; c) replotagem da curva de compactação usando símbolos diferentes para permeabilidades maiores e menores que a admissível; d) zona aceitável modificada conforme outros parâmetros (BENSON e DANIEL, 1990). ....	15
Figura 2.7 - Uso da condutividade hidráulica, da resistência ao cisalhamento e da contração para definir a zona aceitável global (BENSON e DANIEL, 1990).....	16
Figura 2.8 - Zona aceitável baseada na condutividade hidráulica, contração volumétrica e resistência ao cisalhamento (DANIEL & WU, 1993). ....	16
Figura 2.9 - Carta de classificação MCT (NOGAMI & VILIBOR) .....	21
Figura 3.1 – Local de retirada da amostra de Samambaia (Fonte: GOOGLE MAPS).....	23
Figura 3.2 – Fluxograma dos ensaios pela metodologia MCT.....	26
Figura 3.3 – Croqui da aparelhagem de ensaio de mini-Proctor .....	27
Figura 3.4 – Esquema de um permeâmetro de parede Rígida (Modificado – Daniel, 1994) ...	28
Figura 3.5 – Equipamento do ensaio de Resistência à Compressão Simples.....	29
Figura 4.1 – Curva granulométrica da amostra de solo (Modificado - Costa, 2015).....	30
Figura 4.2 - Carta de Plasticidade com indicação do ponto correspondente ao solo (Modificado – Costa, 2015).....	31
Figura 4.3 – Corpos de prova durante o ensaio de perda de massa.....	32
Figura 4.4 – Curvas de deformabilidade .....	33
Figura 4.5 – Curvas de compactação do ensaio de mini-MCV .....	33
Figura 4.6 – Carta de classificação MCT com indicação do ponto correspondente ao solo ....	34
Figura 4.7 – Dados de características dos grupos da classificação MCT (Modificado – Nogami & Villibor, 1995) .....	35
Figura 4.8 – Curva de compactação para as energias reduzida, normal e modificada.....	36
Figura 4.0.9 – Ensaio de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede rígida com carga variável.....	37
Figura 4.10 – Variação do coeficiente de permeabilidade na energia reduzida.....	38
Figura 4.11 – Variação do coeficiente de permeabilidade na energia normal .....	39
Figura 4.12 – Variação do coeficiente de permeabilidade na energia modificada.....	39
Figura 4.13 – Corpos de prova ao fim do ensaio de retração volumétrica .....	40
Figura 4.14 – Variação volumétrica ao longo dos dias dos pontos da energia reduzida.....	41
Figura 4.15 – Variação volumétrica ao longo dos dias dos pontos da energia normal .....	41
Figura 4.16 – Variação volumétrica ao longo dos dias dos pontos da energia modificada.....	42
Figura 4.17 – Gráfico de tensão x deformação dos pontos da energia normal.....	43
Figura 4.18 – Gráfico de tensão x deformação dos pontos da energia modificada.....	43

Figura 4.19 – Gráfico de tensão x deformação dos pontos da energia reduzida .....	44
Figura 4.20 – Variação da resistência à compressão simples em função da energia de compactação .....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Dados referentes a coleta e geração de RSU no Distrito Federal nos anos de 2013 e 2014 .....	6
Tabela 4.1 – Frações granulométricas da amostra de solo .....	31
Tabela 4.2 – Umidade ótima e massa específica aparente seca de cada energia de compactação .....	36
Tabela 4.3 – Valores obtidos de permeabilidade (k) .....	37
Tabela 4.4 – Valores obtidos de retração volumétrica para cada um dos pontos ensaiados ....	40
Tabela 4.5 – Valores obtidos de resistência à compressão simples .....	43

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Altura do Corpo de Prova
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
$a_n$	Diferença de altura pela leitura do extensômetro
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CETESB	Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental
CH	Argila com alta Compressibilidade
CL	Argila com Baixa Compressibilidade
Ct	Contração
$c'$	Coefficiente de deformabilidade da classificação MCT
$d'$	Coefficiente angular da curva de 12 golpes
IP	Índice de Plasticidade
$e'$	Índice de classificação MCT
hab	Habitantes
HRB	Highway Research Board
k	Condutividade hidráulica
kg	Quilograma
L	Laterítico
LA	Laterítico areia
LA'	Laterítico arenoso
LG'	Laterítico argiloso
LL	Límite de Liquidez
kPa	Quilo Pascal
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
MCV	Moisture Condition Value
n	Número de golpes
N	Não Laterítico
NA	Não laterítico areia
NA'	Não laterítico arenoso
NBR	Norma Brasileira
NG'	Não laterítico argiloso

NS'	Não laterítico siltoso
OH	Solo Orgânico com Alta Compressibilidade
Pd	Massa Desprendida
PNRS	Plano Nacional Resíduos Sólidos
Ps	Massa do Solo Seco do Corpo de Prova
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SC	Argila Arenosa
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
t	Toneladas

# CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

## 1.1 INTRODUÇÃO

Aliado ao crescimento populacional, uma das preocupações mundiais é o aumento do consumo de produtos industrializados e a conseqüentemente a geração de resíduos sólidos urbanos. Esta situação tende a aumentar a importância do correto encaminhamento dos resíduos sólidos para locais adequados. Caso não haja uma correta disposição podem ser produzidos inúmeros impactos ao meio ambiente, pois a decomposição destes resíduos gera substâncias altamente tóxicas que contaminam diretamente o solo, as águas, o ar, ou pior ainda, chega a afetar as pessoas. (ABRELPE, 2014)

Existem diferentes maneiras de tratar, dispor e/ou minimizar os resíduos sólidos. Entretanto, os aterros sanitários têm-se destacado como uma técnica viável de disposição pois possuem um baixo custo comparado com outras tecnologias de tratamento como a incineração por exemplo. Além disso, representa uma tecnologia amplamente conhecida e pouca complexidade em termos de operação.

O correto funcionamento das camadas de cobertura, parte da estrutura de um aterro sanitário, torna-se essencial pela função de impedir que o percolado contamine o solo de fundação e as águas subterrâneas pela minimização da infiltração da água da chuva.

Estas barreiras impermeabilizantes são usualmente construídas com solos compactados, assim como podem ser usados geossintéticos, como geomembranas e os geocompostos bentoníticos. Sendo os geossintéticos usados em conjunto com os solos compactados, que podem ter seu arranjo variados de acordo com a periculosidade do resíduo e das condições hidrogeológicas do local. (PIEDADE JR., 2003)

Para que o solo possa cumprir sua função impermeabilizante é importante que se tenha uma baixa condutividade hidráulica, assim como essa propriedade não deva ser afetada por ressecamento ou outros fatores que possam aumentar a permeabilidade do solo. Daniel e Wu (1993) desenvolveram uma metodologia em que a partir da massa específica seca e do teor de umidade do material compactado, são determinados valores para os parâmetros de condutividade hidráulica, resistência à compressão e contração volumétrica que garantam aos solos compactados uma adequada condição impermeabilização quando aplicado em camadas de cobertura.

## 1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral apresentar uma visão geral do cenário da geração e coleta de resíduos sólidos urbanos no Brasil, assim como a gestão e formas sustentáveis de disposição considerado o modo mais adequado com os aterros sanitários. Propõe-se também mostrar a estrutura típica dos aterros sanitários, focando mais especificamente nas camadas de cobertura em solos compactados e sua importância para o correto funcionamento dos aterros sanitários. Como aplicação foi feita a avaliação do solo do Aterro Sanitário Oeste do DF para ser usado na camada de cobertura.

### 1.2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Como objetivo específico deste trabalho será estudado o solo escolhido dentro da metodologia de Daniel e Wu (1993) que recomendam parâmetros mínimos de condutividade hidráulica, retração volumétrica e resistência a compressão, para que possa ser utilizado em camadas de cobertura. Também tem como objetivo estudar a aplicabilidade da metodologia MCT, que permite fazer a classificação do solo e avaliar propriedades hidráulicas e mecânicas, no contexto da metodologia de Daniel e Wu (1993).

## CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A norma NBR 10004/14 define resíduos sólidos como:

Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Ainda segundo a norma NBR 10004/14 os resíduos sólidos são divididos em classes, sendo estas:

- Classe I – Perigosos: São aqueles que, em função de suas características intrínsecas de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, apresentam riscos à saúde pública através do aumento da mortalidade ou da morbidade, ou ainda provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.
- Classe II:
  - Classe IIA - Não inertes: São os resíduos que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente
  - Classe IIB – Inertes: São aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente, e que, quando amostrados de forma representativa, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, a temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água.

### 2.2 PROBLEMAS COM OS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Um dos aspectos mais importantes que tem se levantado sobre resíduos sólidos é a sua correta disposição, sendo isto atrelado a aspectos da saúde coletiva, questões ambientais como

proteção de lençóis freáticos e cursos d'água, também por questões sociais, ou devido a pressões vindas de atividades de lazer e turismo (MONTERO *et al*, 2001).

Os modos de disposição de resíduos sólidos urbanos mais praticadas são a reciclagem, compostagem, incineração ou aterros sanitários. A prática mais utilizada no Brasil e no mundo, devido ao baixo custo, tem sido a aplicação de sistemas de disposição na forma de aterros sanitários. Porém, ainda é comum a utilização de lixões e aterros controlados em muitos países em desenvolvimento, assim como em diversos estados brasileiros. (COSTA, 2015)

### 2.2.1 ÂMBITO NACIONAL

Os dados mais atuais da Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2104), que foram colhidas no ano de 2014, mostram que a geração de RSU no Brasil foi de aproximadamente 78,6 milhões de toneladas, se comparado com os valores de 2013, mostra-se um aumento de 2,9%, sendo que para o mesmo período a taxa de crescimento da população brasileira foi de 0,9%. A diferença entre estes índices pode ser explicada pelo o aumento de geração de RSU per capita que foi de 2,02%. A comparação entre os anos de 2013 e 2014 é representado na Figura 2.1:

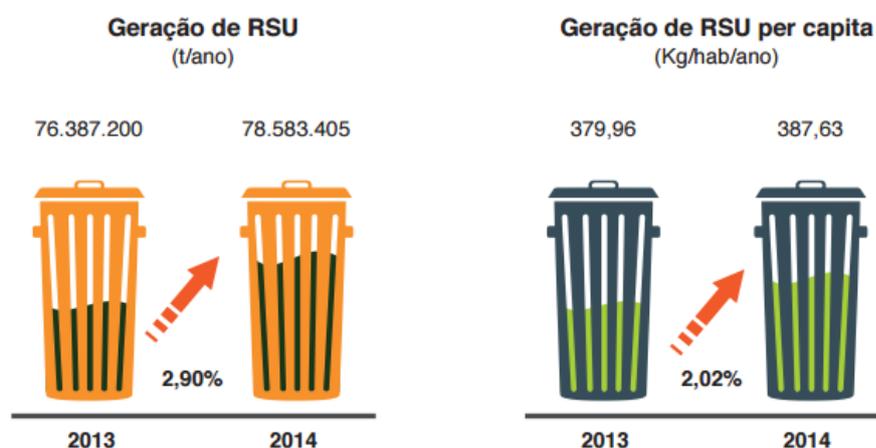


Figura 2.1 - Comparativo entre a geração de RSU em t/ano e em kg/hab/ano nos anos de 2013 e 2014 (ABRELPE, 2014)

Segundo a ABRELPE (2014), em 2014, 71.260.045 toneladas de RSU foram coletadas no ano, um valor de 351,49 Kg/hab/ano. Se compararmos os dados da geração de resíduos sólidos com os dados da coleta, nota-se que 90,6% do resíduo gerado foi coletado, conseqüentemente o que não foi coletado teve uma destinação inapropriada.

Outro aspecto apresentado pela ABRELPE é a comparação, entre os anos de 2013 e 2014, para a destinação final do RSU. A partir dos dados vê-se que a situação da destinação final se manteve estável. Em 2014, 58,4% do RSU teve um destino adequado, o que pode ser considerado um valor significativo, porém 29.659.170 toneladas no ano tiveram uma destinação inadequada, ou seja, foram para lixões ou aterros controlados, que quando se pensa no impacto ambiental e na saúde pública, tornam-se em valores alarmantes. Os valores obtidos são apresentados na Figura 2.2:



Figura 2.2 - Comparativo entre a destinação final de RSU em t/ano nos anos de 2013 e 2014 (ABRELPE, 2014)

Vendo-se este conjunto de dados sobre a geração, coleta e destinação final, percebe-se que em âmbito nacional a disposição correta dos resíduos sólidos tem crescido de forma pequena e ainda é necessário fazer melhorias.

### 2.2.2 DISTRITO FEDERAL

No Distrito Federal, desde a década de 60, o Lixão do Jóquei tem sido utilizado como área de disposição final dos resíduos sólidos e atualmente recebe 100% (ABRELPRE, 2014) do lixo que é coletado no Distrito Federal. Segundo o Relatório dos Serviços de Limpeza Urbana e Manejo dos Resíduos Sólidos do Distrito Federal (SLU DF, 2015), 91% dos resíduos coletados foram dispostos no Lixão do Jóquei e o restante foram destinados para unidades de tratamento mecânico biológico.

A utilização do Lixão do Jóquei, localizado na cidade Estrutural, tem causado preocupantes impactos sobre os corpos hídricos, pois existe a possibilidade de contaminação de águas subterrâneas por lixiviados por meio da decomposição do lixo e acelerado pela

infiltração no solo. A situação se torna ainda mais crítica, pelo fato que os mananciais da região são frequentemente utilizados pelos habitantes locais e também fazem parte da Bacia do Lago Paranoá, que é uma importante bacia hidrográfica do Distrito Federal.

De acordo com os dados da ABRELPE (2014), no Distrito Federal no ano de 2014 foram geradas 4.552 toneladas por dia. A quantidade coletada foi de 4.432 toneladas por dia, ou seja, 95,7% do resíduo sólido gerado foi coletado. Fazendo-se uma comparação com o ano de 2013, a quantidade de resíduo coletado por kg/hab/dia foi de 1,551, o mesmo valor de 2014. O valor de resíduos gerados no ano de 2014 foi maior, por consequência do aumento da população. Os valores comparativos entre o ano de 2013 e 2014 podem ser vistos na Tabela 2.1:

Tabela 2.1 - Dados referentes a coleta e geração de RSU no Distrito Federal nos anos de 2013 e 2014

População Total		RSU Coletado				RSU Gerado	
		(kg/hab/dia)		(t/dia)		(t/dia)	
2013	2014	2013	2014	2013	2014	2013	2014
2.789.761	2.852.372	1,551	1,55	4.326	4.423	4.423	4.552

A Figura 2.3 mostra o comparativo da disposição do lixo no Distrito Federal nos anos de 2013 e 2014. Pode ser notado que não há uma disposição correta, pois 100% dos resíduos são encaminhados para aterro controlado, que não se difere muito dos lixões.

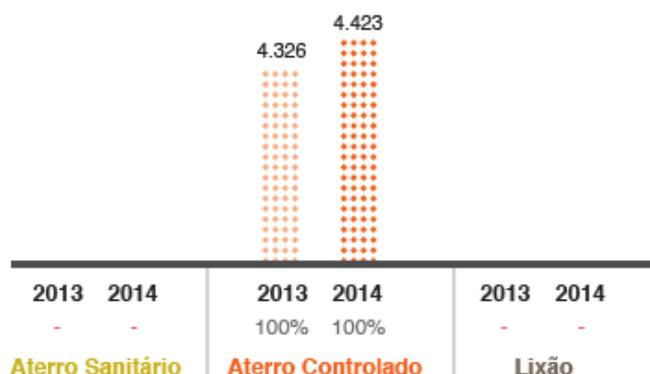


Figura 2.3 - Disposição de resíduos sólidos no Distrito Federal (ABRELPE, 2014)

### 2.3 LEI DA POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Visando mudar o quadro da inadequada disposição dos resíduos sólidos, o governo instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) pela Lei 12.305 do ano de 2010. A lei tem como objetivo dar responsabilidades compartilhadas pela gestão integrada e pelo

gerenciamento dos resíduos sólidos aos geradores de resíduos, ao poder público, sendo a União, estados e municípios, e aos envolvidos economicamente. A lei foi regulamentada pelo Decreto 7.404/10 (BRASIL, 2010), que estabelece normas e procedimentos para sua implementação, incluindo a obrigatoriedade de elaboração de planos municipais e estaduais de gerenciamento de RSU, assim como de Plano Nacional de Resíduos Sólidos.

Em 2011 foi elaborada, de forma preliminar, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Neste plano é mostrada a situação da geração, coleta, tratamento e disposição dos resíduos no país, assim como metas e quais são as ações necessárias para alcançar as metas. Dentre essas metas pode-se destacar:

- Extinção dos lixões a céu aberto até 2014.
- Redução em até 70% dos resíduos recicláveis ou reutilizáveis dispostos em aterros.
- Redução na geração de lixo de 1,1 kg/hab./dia para 0,6 kg/hab./dia.
- Inserção de 600 mil catadores.

Os prazos para adequação da destinação final de resíduos estabelecidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos venceram em agosto de 2014 e o objetivo não foi alcançado, fazendo com que ainda seja registrada a utilização de lixões em todas as regiões do país.

Considerando as metas previstas na Política e Plano Nacional de Resíduos Sólidos, o País precisa investir R\$ 11,6 bilhões até 2031 na infraestrutura para universalizar a destinação final adequada dos resíduos sólidos. (ABRELPE, 2014).

## 2.4 ATERROS SANITÁRIOS

De acordo com Catapreta (2008), o aterro sanitário é a forma correta de dispor os rejeitos no solo. Seu projeto de engenharia é baseado em critérios e normas operacionais específicas: os resíduos dispostos são cobertos com material inerte, com o objetivo de controlar a entrada de ar e água, controlar a saída de gás do aterro, reduzir o odor e de outros inconvenientes e facilitar a recomposição da paisagem, dentre outros fatores.

A norma NBR 8.419 (ABNT, 1984) define o aterro sanitário como:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

Assim como os outros métodos de disposição dos resíduos, os aterros sanitários apresentam vantagens e desvantagens. Dentre as vantagens podem ser citados: baixo custo operacional, tecnologia amplamente conhecida e possibilidade de aproveitamento do biogás, que pode ser aproveitado para geração de produtos como energia elétrica, calor e metano. Já as desvantagens são a necessidade de grandes áreas para o empreendimento, geração de odores característicos, é necessário a captura e tratamento do chorume e após a capacidade esgotada, ainda exige cuidados e manutenção, por anos. (ABRELPE, 2015)

O Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (Monteiro *et al.*, 2001) traz as recomendações de alguns critérios técnicos para a escolha da área do aterro sanitário:

- As distâncias mínimas recomendadas pelas normas federais e estaduais são as seguintes:
  - Para aterros com impermeabilização inferior através de manta plástica sintética, a distância do lençol freático à manta não poderá ser inferior a 1,5 metro.
  - Para aterros com impermeabilização inferior através de camada de argila, a distância do lençol freático à camada impermeabilizante não poderá ser inferior a 2,5 metros e a camada impermeabilizante deverá ter um coeficiente de permeabilidade menor que  $10^{-6}$  cm/s.
- É desejável que as novas áreas de aterro sanitário tenham, no mínimo, cinco anos de vida útil.
- A bacia de drenagem das águas pluviais deve ser pequena, de modo a evitar o ingresso de grandes volumes de água de chuva na área do aterro.
- É desejável que o solo do terreno selecionado tenha uma certa impermeabilidade natural, com vistas a reduzir as possibilidades de contaminação do aquífero. As áreas selecionadas devem ter características argilosas e jamais deverão ser arenosas.
- O terreno deve possuir ou se situar próximo a jazidas de material de cobertura, de modo a assegurar a permanente cobertura do lixo a baixo custo.

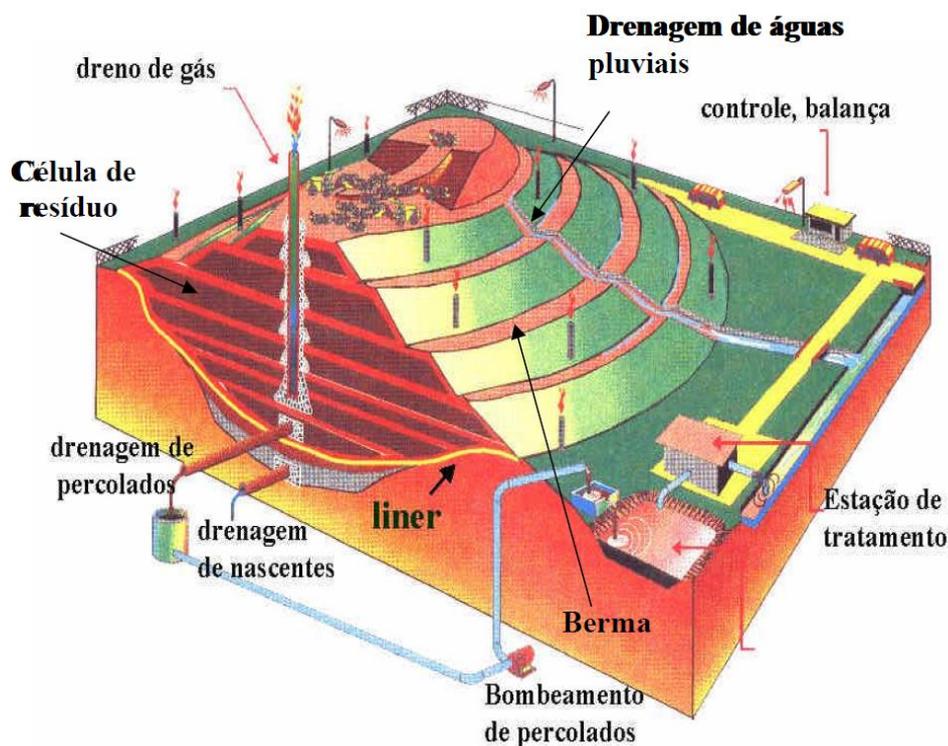


Figura 2.4 - Aterro Sanitário (GODOY, 2007 *apud* PIEDADE JR., 2003)

#### 2.4.1 CAMADA DE COBERTURA

A cobertura final pode variar conforme as características geotécnicas do material utilizado e de acordo com as características climatológicas da região onde se encontra instalado o aterro.

Não existe nas normas brasileiras ênfase aos aspectos técnicos de uma camada de cobertura final de aterros sanitários, sendo que as recomendações dadas se referem a aspectos gerais, sem muitas informações sobre dimensionamento e especificações técnicas.

Usualmente no Brasil, as coberturas de aterro são feitas como uma barreira de solo compactado com espessura de 60 cm, sendo o material constituinte de baixa condutividade hidráulica saturada e acima dessa, uma camada de solo de aproximadamente 15 cm com cobertura vegetal. (CATAPRETA, 2008)

O objetivo principal da camada de cobertura é impedir a entrada de líquidos no interior do corpo do aterro. O método mais utilizado consiste no uso de solos compactados com baixa condutividade hidráulica. Também existem outros métodos, como a utilização de uma geomembrana em conjunto com o solo compactado de baixa condutividade hidráulica. (HUSE, 2007)

De acordo com Saarela (1997) *apud* Huse (2007), existem algumas recomendações para um sistema de camadas de cobertura. As seguintes camadas podem estar presentes: camada de controle de gás, camada de fundação, barreira hidráulica, camada drenante, camada biótica, camadas filtrantes/filtros e camada superficial para fins de vegetação. Algumas das características que podem ser designadas para cada camada são:

- Camada de controle de gás: Sua função é direcionar os gases produzidos pela massa de resíduo, que são gerados a partir da decomposição da matéria orgânica, para a atmosfera.
- Camada de proteção: Tem como função separar o material fino dos grossos, prevenindo o entupimento da parte de granulometria grossa pelos finos. Assim, previne a mistura dos materiais de diferentes granulometrias, permitindo a passagem de fluidos, água e gases.
- Camada de proteção inferior: Essa camada impede danos químicos e mecânicos que a massa de lixo pode provocar na barreira hidráulica, também tem a função de isolar a barreira hidráulica da massa de lixo e servir como suporte para as demais camadas do sistema.
- Barreira hidráulica: Tem como função mudar a direção e/ou impedir a percolação de qualquer forma de precipitação. Deve-se ter o cuidado para que a barreira hidráulica não sofra danos causados por raízes de plantas ou por animais.
- Camada drenante: Essa camada intercepta a percolação de precipitação, conduzindo-a lateralmente para fora do sistema.
- Barreira biótica: Tem como função impedir que as raízes da vegetação e a presença de animais danifiquem as camadas inferiores, especialmente a barreira hidráulica.
- Camada superficial: Ajuda a prevenir a erosão, expelir parte da água do sistema de cobertura através da evapotranspiração, assim como trazer melhorias estéticas ao ambiente

A CETESB (1993) indica que o solo mais indicado para construção de camadas impermeabilizantes seja argiloso, devendo atender as seguintes características:

- Classificação por SUCS como CL, CH, SC ou OH;
- Porcentagem que passa na peneira 200 maior que 30%;
- Coeficiente de permeabilidade inferior a  $10^{-9}$  m/s;
- $LL \geq 30\%$ ;
- $IP \geq 15\%$ ;

- $\text{pH} \geq 7$ .

A eficiência dos sistemas de cobertura final de aterros sanitários mostra-se importante no comportamento dessas obras, pois pode afetar inúmeros aspectos do seu desempenho (CATAPRETA, 2008).

#### 2.4.1.1 COMPACTAÇÃO

Um das propriedades que devem ser analisadas, quando um solo é estudado para ser utilizado na camada de cobertura, é a condutividade hidráulica. Esta propriedade está relacionada a estrutura do solo compactado, visto que o mesmo solo pode ter duas estruturas distintas, a floclada e a dispersa. (PIEIDADE JR., 2003)

Em estudos realizados por Mitchel *et al.* (1965) foram identificadas variáveis que influenciam a condutividade hidráulica das argilas compactadas. Foi mostrado que a energia de compactação e o teor de umidade influenciam a condutividade hidráulica.

Ainda de acordo com Mitchel *et al.* (1965), os fatores citados geram variações na estrutura do solo em sua macro e micro escala. Na macro escala o aumento da capacidade de colapso das partículas de argila e da eliminação dos poros interpartículas são gerados pelo aumento do teor de umidade e energia de compactação, já na micro escala o aumento destes geram a reorientação das partículas de forma a reduzir os poros interpartículas. Segundo Acar & Olivieri (1989), o aumento da energia de compactação diminui a frequência de grandes poros e estas mudanças de tamanhos dos poros diminuem a condutividade hidráulica.

A Figura 2.5 mostra o resultado da variação da condutividade hidráulica com o teor de umidade e energia de compactação. Pode-se observar que a condutividade hidráulica diminui com o aumento do teor de umidade e energia de compactação.

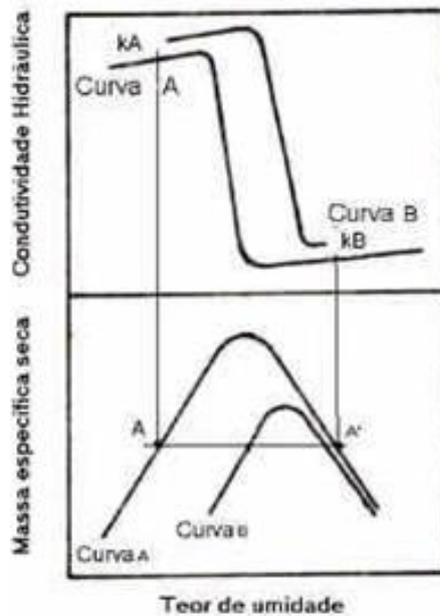


Figura 2.5 - Variação da Condutividade hidráulica com o Teor de umidade. DANIEL (1984)

#### 2.4.1.1.1 COMPACTAÇÃO PROCTOR

O ensaio de compactação Proctor foi desenvolvido em 1933 pelo engenheiro Ralph Proctor, que mostrou que ao aplicar uma certa energia de compactação, que é determinada por um certo número de passadas de um determinado equipamento no campo ou um certo número de golpes de um soquete sobre o colo contido num molde, a massa específica resultante é função da umidade em que o solo estiver (PINTO, 2000). No Brasil o ensaio foi padronizado pela NBR 7182 (ABNT, 1986). O ensaio consiste em compactar uma porção de solo em um cilindro de volume conhecido, fazendo-se variar a umidade de forma a obter curva de compactação, da qual se obtém a umidade ótima de compactação. O ensaio pode ser realizado em três níveis de energia de compactação, conforme as especificações da obra: normal, intermediária e modificada.

#### 2.4.1.2 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A constituição do solo é de partículas sólidas com vazios entre elas. Existem interconexões entre essas partículas que criam caminhos preferenciais para a passagem da água. A partir da aplicação de uma diferença de carga hidráulica através da amostra de solo, que está previamente saturada, pode-se determinar a condutividade hidráulica. De acordo com Lambe & Whitman (1969), a condutividade hidráulica é a taxa a qual um fluido pode fluir

através dos vazios de um solo. O coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) representa a velocidade de escoamento média do fluxo de água em um solo sob a ação de um gradiente hidráulico unitário. A importância do estudo da condutividade hidráulica destaca-se em casos onde ocorre fluxo nos meios porosos. No que se refere a camada impermeabilizantes, um requisito essencial ao solo usado é um baixo valor de condutividade hidráulica, fazendo com que a escolha adequada do solo se torne imprescindível. (COSTA, 2015)

A partir de estudos realizados por Benson *et al.* (1994) nos Estados Unidos, foi possível relacionar a condutividade hidráulica a parâmetros da mecânica dos solos como grau de compactação, limites de Atterberg e tipo de compactador. Como resultado do estudo chegou-se a fatores que diferenciam o comportamento da condutividade hidráulica dos solos para utilização em barreiras hidráulicas encontram-se:

- Estrutura dos solos compactados
- Composição granulométrica e argilominerais
- Limites de consistência
- Natureza do líquido percolado

A caracterização dos solos é de fundamental importância, pois os limites de consistência têm representativa influência na condutividade hidráulica dos solos. De acordo com Mitchell (1976), maiores limites de liquidez e índices de plasticidade estão associados a solos de maior quantidade de partículas de argila e maior superfície ativa.

Segundo Benson *et al.* (1999) a condutividade hidráulica das argilas compactadas de altas plasticidade é bastante influenciada pelo tamanho dos torrões existentes no solo. A influência do tamanho dos poros na condutividade hidráulica tende a ser significativa para solos compactados no ramo seco da curva de compactação e na energia do proctor normal. Para solos compactados no ramo úmido da curva de compactação, o tamanho dos torrões não é importante, pois neste estado eles se encontram moles e compressíveis. Desta forma torna-se fácil a remoldagem dos torrões.

Benson & Daniel (1990) estudaram parâmetros limitantes para a obtenção de valores pré-estabelecidos de condutividade hidráulica para a utilização principalmente como impermeabilizante de aterros sanitários. Os autores usaram a metodologia proposta por Mundell & Bailey (1985) e Boutweel & Hedges (1989), onde é recomendada a análise da curva de compactação do solo obtida do ensaio de Proctor. Para isto, analisaram alguns fatores que restringem os valores de teor de umidade e peso específico seco do solo.

A proposta define uma área ideal, uma zona admissível. Esta zona é representada pela combinação de valores de peso específico e teor de umidade, que definem valores desejáveis para condutividade hidráulica, contração e resistência ao cisalhamento. Na proposta destes autores (na zona admissível) o peso específico assume valores maiores ou iguais a uma percentagem “P” do peso específico seco do solo, e o teor de umidade variando entre 0 até +4% do teor de umidade ótimo e tem como limite a curva de saturação de 100%. Geralmente, adota-se para esta percentagem “P” 95% do peso específico seco no Ensaio de Proctor Normal (ASTM D698) ou 90% no Ensaio de Proctor Modificado (ASTM D-1557).

A diferença de percentagens admitidas nos diferentes ensaios de compactação dá-se pelo fato de que a energia de compactação aplicada e o método utilizado influenciam significativamente na condutividade hidráulica, onde o aumento da energia de compactação significa a diminuição da condutividade hidráulica (MITCHELL *et al.*, 1965).

Entretanto, vários estudos têm revelado que a combinação entre o teor de umidade e o peso específico seco adotados na zona admissível não representam obrigatoriamente solos argilosos com condutividade hidráulica menor que  $1 \times 10^{-9}$  m/s, mas sim valores maiores. Mediante isto, uma nova metodologia recomenda a aproximação de valores, modificando, assim, também os resultados da condutividade hidráulica.

Desta forma, Benson & Daniel (1990) recomendam alguns procedimentos adicionais conforme descritos abaixo:

1. Fazer a compactação do solo em laboratório com energias de compactação do Proctor Modificado, Normal e Reduzido, a partir disto, desenvolver várias curvas de compactação como mostra a Figura 2.6a, devendo-se compactar de cinco a seis corpos de prova para cada energia.

2. Determinar a condutividade hidráulica dos solos compactados para cada corpo de prova. As medidas de permeabilidades devem ser plotadas em função do teor de umidade como mostra a Figura 2.6b.

3. Os pontos com permeabilidades admissíveis ( $\leq 1 \times 10^{-9}$  m/s) devem ser plotados com símbolos diferentes dos não admissíveis ( $> 1 \times 10^{-9}$  m/s). A zona admissível é desenhada de forma que os valores de permeabilidade admissíveis estejam contidos nela. (Figura 2.6c).

4. A zona admissível deve ser modificada (Figura 2.6d) baseada em outros parâmetros como por exemplo resistência à compressão, considerações de umedecimento e secagem, aparecimento de fissuras, interesses construtivos e práticas locais.

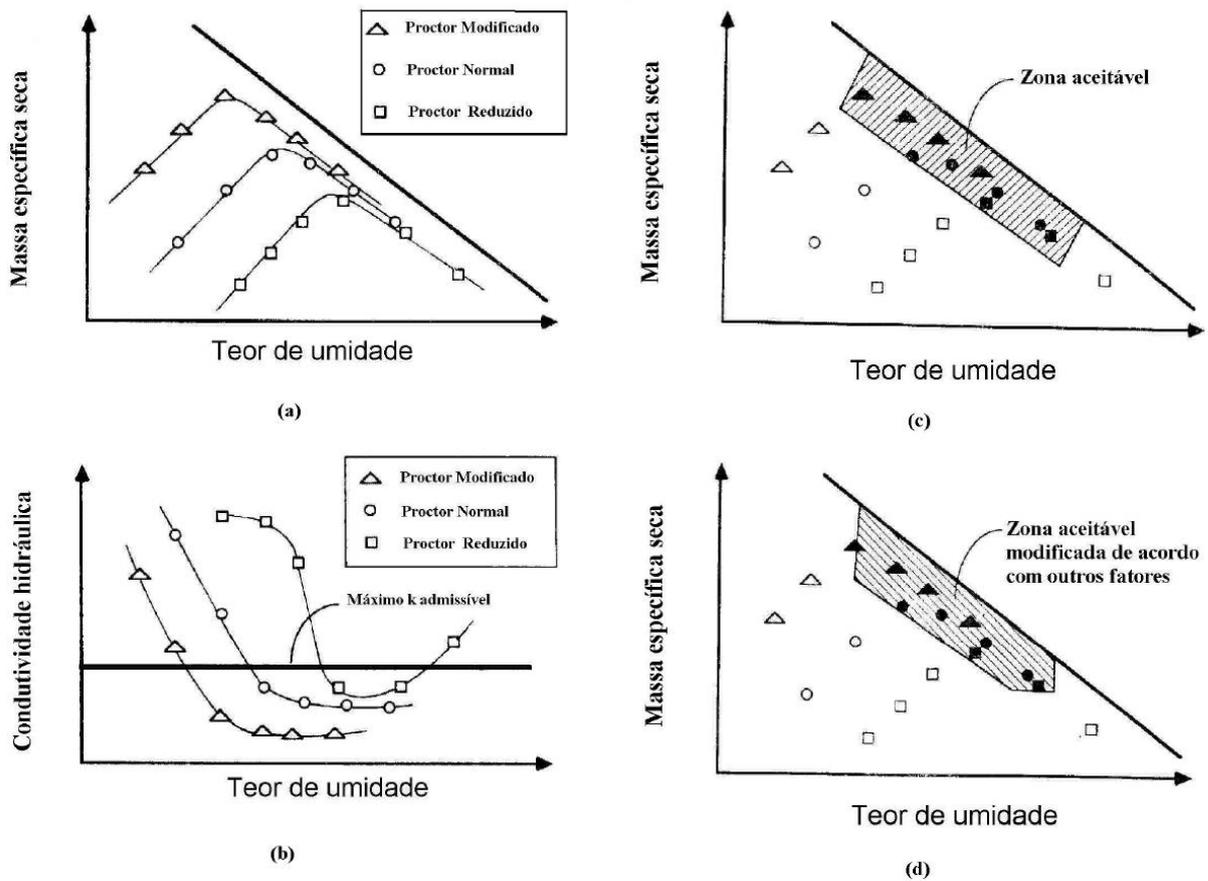


Figura 2.6 - Recomendações de projeto: (a) determinação da curva de compactação com o Proctor Modificado, Normal e Reduzido; b) determinação da condutividade hidráulica; c) replotagem da curva de compactação usando símbolos diferentes para permeabilidades maiores e menores que a admissível; d) zona aceitável modificada conforme outros parâmetros (BENSON e DANIEL, 1990).

O ensaio de Proctor Reduzido corresponde a compactação dos corpos de prova com 15 golpes, enquanto o ensaio de Proctor Normal é feito utilizando 25 golpes. Outro ponto importante de ser notado quanto aos ensaios, não é sugerido pelos autores o tipo de ensaio de permeabilidade que deve ser realizado, mas por incluírem medidas de tensões confinantes presume-se que deve ser realizado o ensaio de parede flexível. (MACAMBIRA, 2002)

A Figura 2.7 mostra como uma zona admissível seria definida a partir de parâmetros de permeabilidade e resistência à compressão.

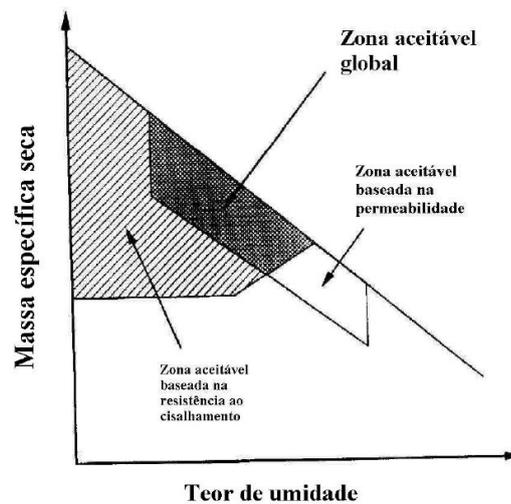


Figura 2.7 - Uso da condutividade hidráulica, da resistência ao cisalhamento e da contração para definir a zona aceitável global (BENSON e DANIEL, 1990).

Daniel & Wu (1993) acrescentaram mais dois parâmetros restritivos a análise, com a finalidade de determinar uma área adequada para a compactação de solos que são aplicados em barreiras impermeabilizantes. Sendo estes dois novos parâmetros a contração e a resistência à compressão.

Os valores propostos pelos autores como limites para a determinação da zona aceitável para a execução das barreiras são 4% de contração volumétrica, 200 kPa de resistência à compressão não confinada, além de  $1 \times 10^{-9}$  m/s de condutividade hidráulica. Com base nesses valores, a área final recomendada é a sobreposição das áreas individuais obtidas para cada fator, como mostra a Figura 2.8.

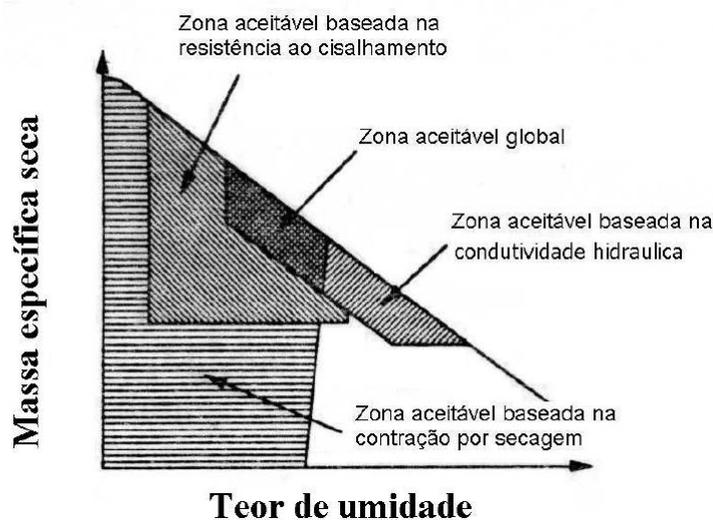


Figura 2.8 - Zona aceitável baseada na condutividade hidráulica, contração volumétrica e resistência ao cisalhamento (DANIEL & WU, 1993).

### 2.4.1.3 CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA

O estudo da contração dos solos para o projeto de barreiras impermeáveis é de grande importância, pois a contração quando aumentada pode gerar o aparecimento de trincas na superfície da barreira, formando caminhos preferenciais de percolação. (PIEIDADE JR., 2003)

Kleppe & Olson (1985) relacionaram a deformação volumétrica e o aparecimento de trincas em placas quadradas com contração volumétrica em corpos de prova cilíndricos de pequenas dimensões. A partir desse ponto foram estabelecidos limites para serem utilizados na prática.

Albrecht & Benson (2001) estudaram alguns fatores que podem afetar a contração e o trincamento em solos compactados quando submetidos à secagem. Os fatores analisados foram o número de ciclos de secagem, as condições de compactação e a composição e mineralogia do solo. Os estudos realizados revelaram que a contração volumétrica e a condutividade hidráulica estão diretamente ligadas ao teor de umidade, à energia de compactação, à porcentagem de argila e ao índice de plasticidade do solo.

## 2.5 SOLOS

Os solos são originados a partir da decomposição das rochas que constituíam a crosta terrestre. A decomposição é decorrente de agentes físicos e químicos. Variações de temperatura provocam trincas, nas quais penetra a água, atacando quimicamente os minerais. O congelamento da água nas trincas, entre outros fatores, gera elevadas tensões, do que decorre maior fragmentação dos blocos. O efeito do clima, presença de água, calor, microorganismos, espécies vegetais promovem o ataque químico, através da hidratação, hidrólise, oxidação, lixiviação, troca de cátions, carbonatação, etc. O conjunto desses processos que são muito mais atuantes em climas quentes do que em climas frios, leva a formação dos solos que, em conseqüências são misturas de partículas pequenas que se diferenciam pelo tamanho e pela composição química. A maior ou menor concentração de cada tipo de partícula em cada solo depende da composição química da rocha que lhe deu origem e da intensidade dos processos de intemperismo.

Os solos são constituídos por um conjunto de partículas com água e ar nos espaços intermediários. As partículas, de maneira geral, encontram-se livres para deslocar entre si. Em alguns casos, uma pequena cimentação pode ocorrer entre elas, mas num grau extremamente

mais baixo do que nos cristais de uma rocha ou de um metal, ou nos agregados de um concreto. (LAMBE E WHITMAN, 1969 *apud* PINTO, 2000).

### 2.5.1 SOLOS LATERÍTICOS

De acordo com Nogami (1995), solo laterítico é definido pelo Comitê de Solos Tropicais da Associação Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações (ISSMEF) como aquele que pertence aos horizontes A, (camada mineral com enriquecimento de matéria orgânica), e ao horizonte B (apresenta máxima expressão de cor, estrutura e/ou que possuem materiais translocados), de perfis bem drenados, desenvolvidos sob atuação de clima tropical úmido.

Os solos lateríticos originaram-se tipicamente de solos em clima quente, com regime de chuvas moderadas a intensas. Nos solos lateríticos a fração argila constitui-se principalmente de minerais caulíníticos e apresentam elevada concentração de ferro e alumínio na forma de óxidos e hidróxidos, gerando uma coloração avermelhada. Esses sais são encontrados, geralmente, recobrando agregações de partículas argilosas.

Na natureza, os solos lateríticos apresentam-se, geralmente, não saturados, com índices de vazios elevados, resultando de uma maneira geral em uma baixa capacidade de suporte. No entanto, quando compactado possui uma capacidade de suporte elevada, e por isto são muito aplicados em pavimentação e em aterros. Após compactado, um solo laterítico apresenta contração se o teor de umidade diminuir, mas não apresenta expansão na presença de água. (PINTO, 2000)

### 2.5.2 SOLOS NÃO LATERÍTICOS

O manto de intemperismo dos solos tropicais abrange basicamente os solos lateríticos, que são profundamente intemperizados, e os solos saprolíticos, pouco intemperizados. Os solos saprolíticos são resultantes da decomposição ou desagregação “in situ” da rocha, mantendo a estrutura da rocha que lhe deu origem (Committee on Tropical Soils of ISSMFE, 1985, *apud* PESSOA, 2004)

Por serem originados pela decomposição de rocha preexistente, os solos saprolíticos herdam a estrutura da rocha matriz, assim como outras características advindas de processos de intemperismo, como a atuação da água das chuvas e subterrâneas e temperatura. A cor é

muito variada, podendo ocorrer partes com cores branca, preta, azul, verde, roxa, rósea, amarela e vermelha. É comum a presença de manchas e mosqueamento com características herdadas da rocha matriz ou que foram desenvolvidas ao longo do processo de intemperismo. Geralmente são encontrados sobrejacentes à camada de rocha sã e frequentemente contém intercalações desse material. As condições de drenagem são várias, podendo ocorrer tanto um lençol freático quanto vários lençóis suspensos. A camada saprolítica é usualmente subdividida em saprólito, menos intemperizado, e solo saprolítico, mais intemperizado. (PESSOA, 2004)

## 2.6 CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS

Existem diferentes metodologias para classificação de solos, como por exemplo, ASTM, SUCS e a HRB. No entanto estas classificações apresentam restrições quando usadas em solos tropicais, pois se adequam principalmente aos solos dos Estados Unidos e Europa. Diante das limitações dos procedimentos tradicionais para a caracterização e classificação, assim como a necessidade de uma metodologia com uma melhor aplicação para solos tropicais foi criado a metodologia MCT (Miniatura, Compactado e Tropical). (NOGAMI & VILLIBOR, 1981)

A classificação unificada (SUCS) foi criada originalmente para obras de aeroportos, sendo atualmente, muito usada para obras de barragens de terra. Neste sistema os solos são identificados por duas letras, a primeira letra indica o tipo principal do solo e a segunda indica dados complementares, baseando-se na granulometria e nos limites de Atterberg. O sistema rodoviário de classificação (HRB) é muito utilizado em obras rodoviárias, criado nos Estados Unidos também se baseia na granulometria e limites de Atterberg. (PINTO, 2000)

### 2.6.1 METODOLOGIA MCT

Considerando estes aspectos, Nogami & Villibor (1981) desenvolveram a metodologia MCT, a qual se baseia em considerações climáticas e em materiais que são predominantes em regiões tropicais. A classificação feita pela metodologia MCT baseia-se em dois ensaios, sendo estes o ensaio mini-MCV, que foi adaptado do ensaio MCV (Moisture Condition Value), proposto por Parsons (1976), e o ensaio de perda de massa por imersão, proposto por Nogami & Villibor (1981).

Para a caracterização expedita do solo pela metodologia MCT são avaliadas as propriedades de deformabilidade, resistência e permeabilidade. A deformabilidade é avaliada a partir da contração diametral por perda de umidade e pela expansão diametral por reabsorção d'água. A resistência é verificada a partir da penetração de uma ponta de aço na pastilha de solo após esta ter sofrido reabsorção de água. Já a permeabilidade é avaliada a partir do tempo para ascensão capilar d'água e capacidade de reabsorção d'água após secagem prévia. Estas propriedades são importantes para a maioria das obras geotécnicas, pois estas propriedades de contração penetração de reabsorção de água, de certa forma sintetizam o comportamento de um solo para aplicação em pavimentação, que foi a necessidade inicial que motivou o desenvolvimento da metodologia MCT. Enquanto a contração se correlaciona com a compressibilidade dos solos compactados, a reabsorção de água e a penetração estão relacionadas com a expansão, a coesão e a resistência desses solos em presença de água. (PESSOA, 2004)

#### 2.6.1.1 COMPACTAÇÃO MINI-MCV

Em relação ao ensaio MCV, o ensaio mini-MCV tem como característica a necessidade de uma menor quantidade de solo utilizada na compactação, sendo 200 g de solo por teor de umidade, assim como a necessidade de um menor esforço para a realização do ensaio. No entanto, este ensaio mantém os outros procedimentos usados no ensaio original, o que permite a obtenção de parâmetros da curva de calibração, teor de umidade versus mini-MCV, sendo similar ao ensaio original de Parsons & Beldon (1979) *apud* Gurjão (2005).

Assim como o ensaio MCV, O mini-MCV permite a obtenção de uma família de curvas de compactação do solo, sendo a curva de massa específica aparente seca *versus* teor de umidade de compactação. As curvas de compactação são obtidas através das alturas parciais atingidas pelo corpo de prova durante a aplicação da sequência de golpes pré-estabelecia, com isso consegue-se abranger desde energias inferiores à normal até além da intermediária. Este ensaio ainda tem como vantagem que seja feito outros ensaios, após moldado os corpos de prova, como o ensaio de mini-CBR e outros da mesma família, para a condição sem imersão ou umidade de moldagem, conforme ressaltam Nogami & Villibor (1980).

Para a execução do ensaio de perda de massa por imersão são tomados os mesmos corpos de prova compactados para a realização do ensaio de mini-MVC. Este ensaio foi proposto por Nogami & Villibor (1980) e tem como objetivo determinar o comportamento do

solo quando imerso em água. O ensaio de perda de massa é uma adaptação de outro ensaio, dos mesmos autores, que avalia a erodibilidade de solos.

Um dos aspectos da metodologia MCT é fazer a classificação dos solos em duas grandes classes, conforme seu comportamento quando compactado, sendo lateríticos (L) e não lateríticos (N), a partir disto pode-se subdividir em outros sete grupos. Para tais subdivisões são levadas em consideração as propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos quando compactados para fins de obras viárias (Pastore e Fontes, 1998 *apud* Gurjão, 2005). As siglas e significados destes grupos são:

- NA: Não laterítico areia. Areias, siltes e misturas de areia e siltes, quartzosos e/ou sericíticos.
- NA': Não laterítico arenoso. Areias quartzosas com finos passando na peneira 0,075mm.
- NS': Não laterítico siltoso. Siltes arenosos.
- NG': Não laterítico argiloso. Solos argilosos.
- LA: Laterítico areia. Areias com pouco finos
- LA': Laterítico arenoso. Solos arenosos
- LG': Laterítico argiloso. Argilas a argilas arenosas.

A partir dos parâmetros  $c'$  e  $e'$ , obtidos respectivamente pelos ensaios de mini-MCV e perda por imersão, pode-se obter pela carta de classificação na Figura 2.9 a qual grupo amostra de solo pertence pelo método MCT.

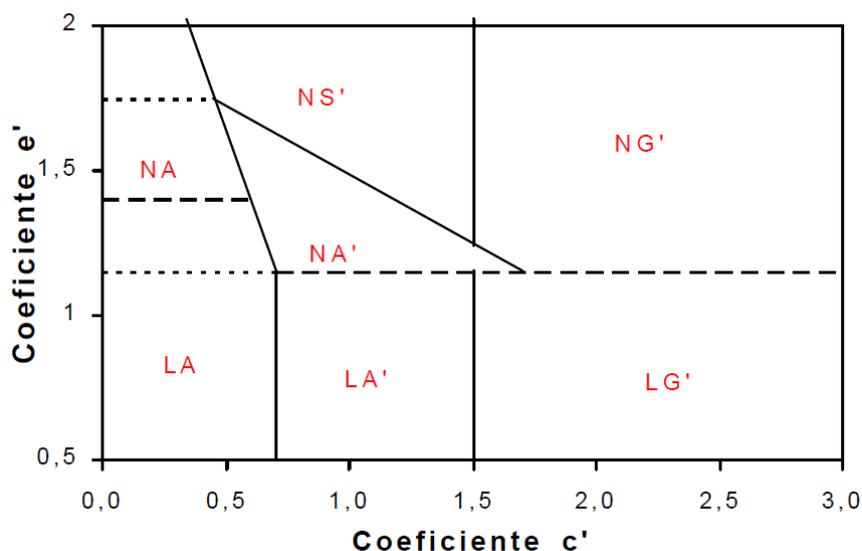


Figura 2.9 - Carta de classificação MCT (NOGAMI & VILIBOR)

### 2.6.1.2 COMPACTAÇÃO MINI-PROCTOR

A metodologia de compactação mini-Proctor equivale à miniaturização do Proctor Tradicional, cujos resultados dos parâmetros obtidos para ambos os métodos são semelhantes. As diferenças das metodologias se dão pela massa de solo compactado, pelo peso do soquete, altura de queda, número de golpes e o diâmetro do molde cilíndrico. O mini-Proctor tem como uma de suas principais características, ser um processo de compactação à seção plena, ou seja, a área do soquete e a do corpo de prova são a mesma. Comparando-se com o proctor tradicional existem algumas vantagens, como uma menor quantidade de amostra de solo para o ensaio, o esforço exigido para aplicação dos golpes do soquete é menor, e também há uma maior uniformidade dos corpos de prova compactados.

No Ensaio de mini-Proctor a compactação é realizada em amostras de solos de granulação fina, isto é que passa na peneira de 2 mm, colocadas em um molde cilíndrico padronizado, na qual é aplicada uma energia de compactação através de um número de golpes, altura de queda do soquete e sua massa, obtendo sempre corpos de prova com altura aproximada de 50 mm.

As energias Normal, Intermediária e Modificada do método mini-Proctor são adotadas respectivamente como 5 golpes do soquete leve, 6 golpes do soquete pesado e 12 golpes do soquete pesado, sendo estes aplicados de cada lado do corpo de prova (NOGAMI & VILIBOR,1995).

## CAPÍTULO 3 –METODOLOGIA DO PROJETO

Para este trabalho foi analisado o solo proveniente do local onde está sendo construindo o aterro sanitário do Distrito Federal a fim de identificar se suas características se adequam no uso de camadas impermeabilizantes de um aterro sanitário. A caracterização do solo foi feita seguindo a metodologia MCT a partir dos ensaios de mini-MCV e de perda de massa por imersão.

Quanto à avaliação para o uso de camadas impermeabilizantes foi utilizada a metodologia proposta por Daniel e Wu (1993), a qual foi realizado ensaios de compactação com base na metodologia de mini-Proctor. A proposta é utilizar esta metodologia na obtenção dos parâmetros necessários a aplicação da metodologia proposta por Daniel e Wu (1993) e verificar a aplicabilidade dos ensaios da metodologia MCT neste tipo de análise.

Seguindo a proposta de obtenção dos parâmetros foram realizados ensaios de permeabilidade a carga variável em permeômetros de parede rígida, ensaios de resistência à compressão simples e ensaios de retração volumétrica. Todos os ensaios realizados seguirão integralmente as normas da ASTM e ABNT

### 3.1 MATERIAL UTILIZADO

O solo que foi utilizado neste trabalho foi coletado na Região Administrativa de Samambaia, Distrito Federal, as coordenadas do local são  $15^{\circ}51'39.9''S$  e  $48^{\circ}09'13.8''W$  (Figura 3.1), entre o córrego Belchior e a Rodovia DF 180, km 52.



Figura 3.1 – Local de retirada da amostra de Samambaia (Fonte: GOOGLE MAPS)

O local da retirada do solo fica onde será construído o Aterro Sanitário do Distrito Federal, situado ao lado da estação de tratamento de esgoto da Companhia de Água e Esgoto de Brasília – CAESB. É previsto que o aterro tenha capacidade para receber 68 mil toneladas por mês de resíduos.

### 3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

#### 3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

Para a caracterização dos solos serão realizados ensaios de análise granulométrica - NBR 7181 (ABNT, 1984-a), determinação do limite de liquidez e plasticidade - NBR 64590 (ABNT, 1984-b) e NBR 7180 (ABNT, 1984-c) e ensaio de peso específico dos grãos realizado com picnômetro convencional - NBR 6508 (ABNT, 1984-d).

#### 3.2.2 ENSAIO MINI-MCV E ENSAIO DE PERDA DE MASSA POR IMERSÃO

O ensaio de compactação mini-MCV é realizado de acordo com as instruções da norma do ME258 (DNER, 1994). Neste ensaio são usados moldes cilíndricos de 50 mm de diâmetro e soquetes de seção plena com peso variável, 2270 g para o tipo leve e 4500 g no tipo pesado, e queda livre de 30 cm.

As amostras são preparadas separando porções de solo, que foram secas ao ar e que passam na peneira de 2 mm, para que sejam umedecidas em diferentes teores de umidade estabelecidos previamente. Coloca-se uma porção de solo de 200 g no molde de compactação, então apoia-se o soquete sobre a amostra e é dado o primeiro golpe ( $n=1$ ) e a partir da leitura do extensômetro a altura  $A_1$  é determinada. Este processo de medição da altura é repetido para a seguinte série de golpes: 2, 4, 6, 8, 12, 16, 24, 32, 48, 64, 96, 128, 192 e 256.

A compactação pode ser encerrada caso aconteça um destes casos: a diferença entre a leitura após  $4n$  golpes e a obtida após  $n$  golpes for menor que 2 mm, aconteça uma nítida expulsão de água, ou o número de golpes atinja 256.

Para cada amostra, com diferente teor de umidade de compactação, são calculadas as diferenças de altura  $a_n$  pela leitura do extensômetro ( $a_n = A_n - A_{4n}$ ). Então é traçado a curva  $n$  (número de golpes) em função das diferenças de altura ( $a_n$ ), sendo que o eixo do número de golpes é traçado em escala logarítmica. A partir das curvas de mini-MCV pode-se determinar

o mini-MCV de cada corpo de prova, que é obtido pelo valor da curva que intercepta a reta de  $a_n=2$  mm.

Com estes mesmo gráfico, pode-se obter o valor do coeficiente  $c'$ , que corresponde ao coeficiente angular da reta que apresenta mini-MCV = 10 mm e  $a_n = 2$  mm. Portanto, o valor de mini-MCV para cada corpo de prova é dado pela equação 3.1:

$$mini - MCV = 10 \log B \quad (3.1)$$

Onde: B é o número de golpes para  $a_n$  igual a 2 mm.

Das alturas dos corpos de prova, feitas para o ensaio de mini-MCV, são calculadas as massas específicas secas. Com isto, é traçado a curva de compactação, teor de umidade *versus* massa específica seca. Com as curvas de compactação pode-se obter o coeficiente  $d'$ , que é dado pelo coeficiente angular da maior angulação do ramo seco da curva de 12 golpes.

Para realização do ensaio de perda por imersão, os corpos de provas compactados são imersos em água durante o período de 24 h na posição horizontal e com 1 cm exposto para fora do cilindro de compactação. Após o período de submersão, recolhe-se a parte que foi desagregada do corpo prova para obter as massas secas e então calcula-se o valor de  $P_i$ : (Equação 3.2).

$$P_i = \frac{10 \cdot P_d \cdot A}{P_s} \quad (3.2)$$

Onde:  $P_d$  = massa despreendida, (g);

A = altura do corpo de prova, (cm);

$P_s$  = massa do solo seco do corpo de prova, (g).

Por meio de uma interpolação gráfica, os resultados da perda de massa por imersão para cada teor de umidade pode-se obter o valor de  $P_i$ , onde é traçado a curva das porcentagens calculadas em função do mini-MCV e procurando-se o valor correspondente a mini-MCV 10 ou 15 conforme se trate de solo de baixa ou elevada massa específica, respectivamente.

Com os valores de  $d'$  e  $P_i$ , calcula-se  $e'$  pela expressão 3.3:

$$e' = \sqrt[3]{\frac{P_i}{100} + \frac{20}{d'}} \quad (3.3)$$

O fluxograma apresentado na Figura 3.2 mostra a sequência de ensaios que devem ser realizados para a caracterização do solo pela metodologia MCT, assim como os coeficientes  $c'$  e  $d'$  são obtidos a partir dos gráficos obtidos com os resultados dos ensaios.

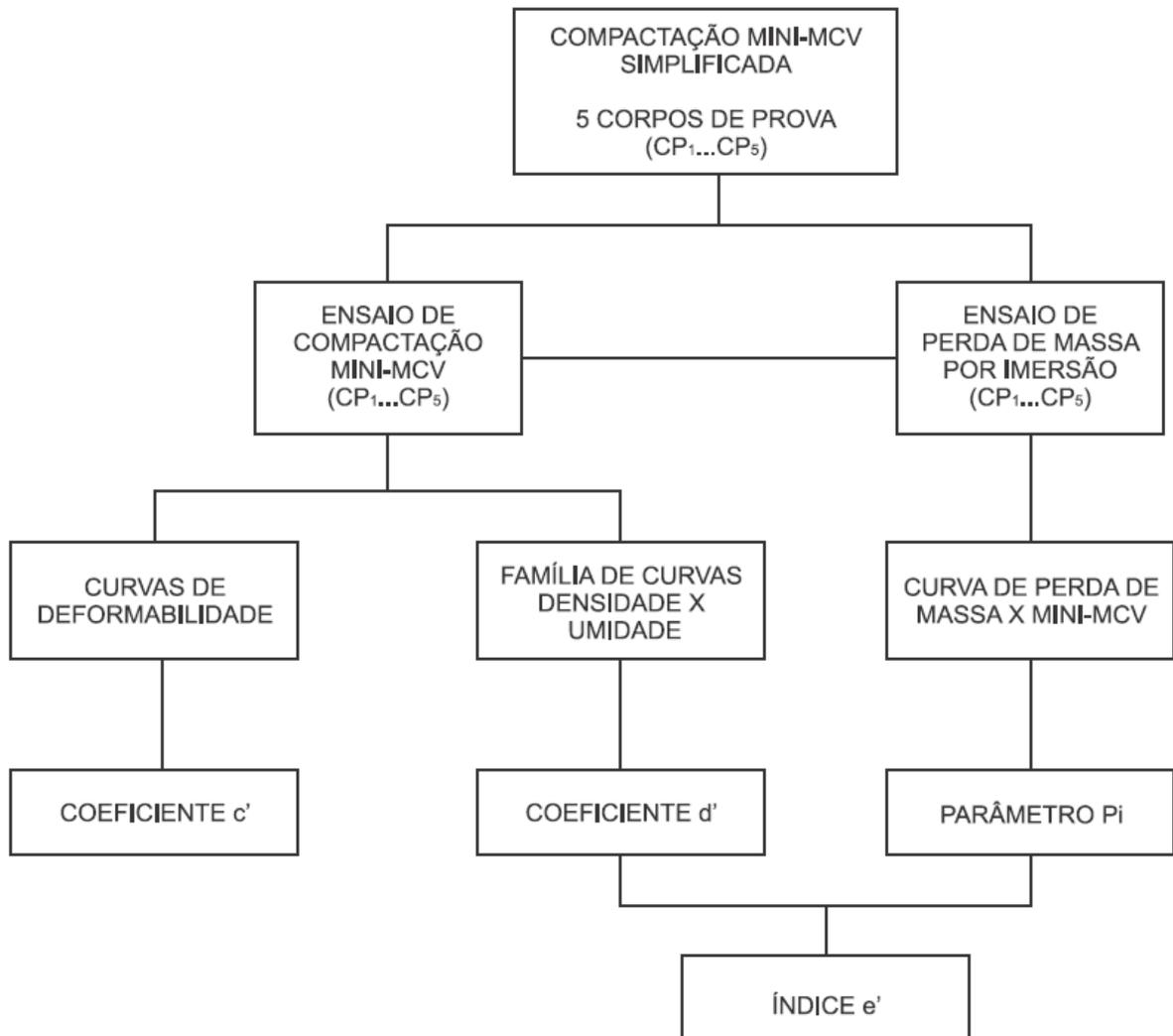


Figura 3.2 – Fluxograma dos ensaios pela metodologia MCT

### 3.3. ENSAIOS DE PROPIEDADES MECÂNICAS E HIDRÁULICAS

#### 3.3.1 ENSAIO DE MINI-PROCTOR

O ensaio de compactação será feito seguindo a norma do ME228 (DNER, 1994), compactação em equipamento miniatura. O ensaio é iniciado pesando-se 200 g da amostra de solo, que foram secas ao ar e tiveram suas umidades higroscópica medidas e acrescidas do

teor de umidade corresponde aos cinco teores de umidade a serem avaliados no ensaio para determinação da curva de compactação. A amostra de solo é inserida do molde compactação. Então são dados os golpes com o soquete e número de golpes apropriado para cada energia de compactação, 5 golpes do soquete leve para energia normal, 6 golpes do soquete pesado para energia intermediária e 12 golpes do soquete pesado para energia modificada. O corpo de prova é invertido e o número de golpes é repetido. A altura do corpo de prova é obtida mediante a leitura do extensômetro que é colocado novamente sobre a haste do soquete. Caso a altura não esteja dentro do intervalo, deve-se calcular por proporção a quantidade de amostra de solo que atenderá o intervalo e com isso repetir a compactação (Figura 3.3).

Para cada corpo de prova é calculado a massa específica aparente do solo seco e os teores de umidade correspondentes, então com os dados obtidos é desenhada a curva de compactação.

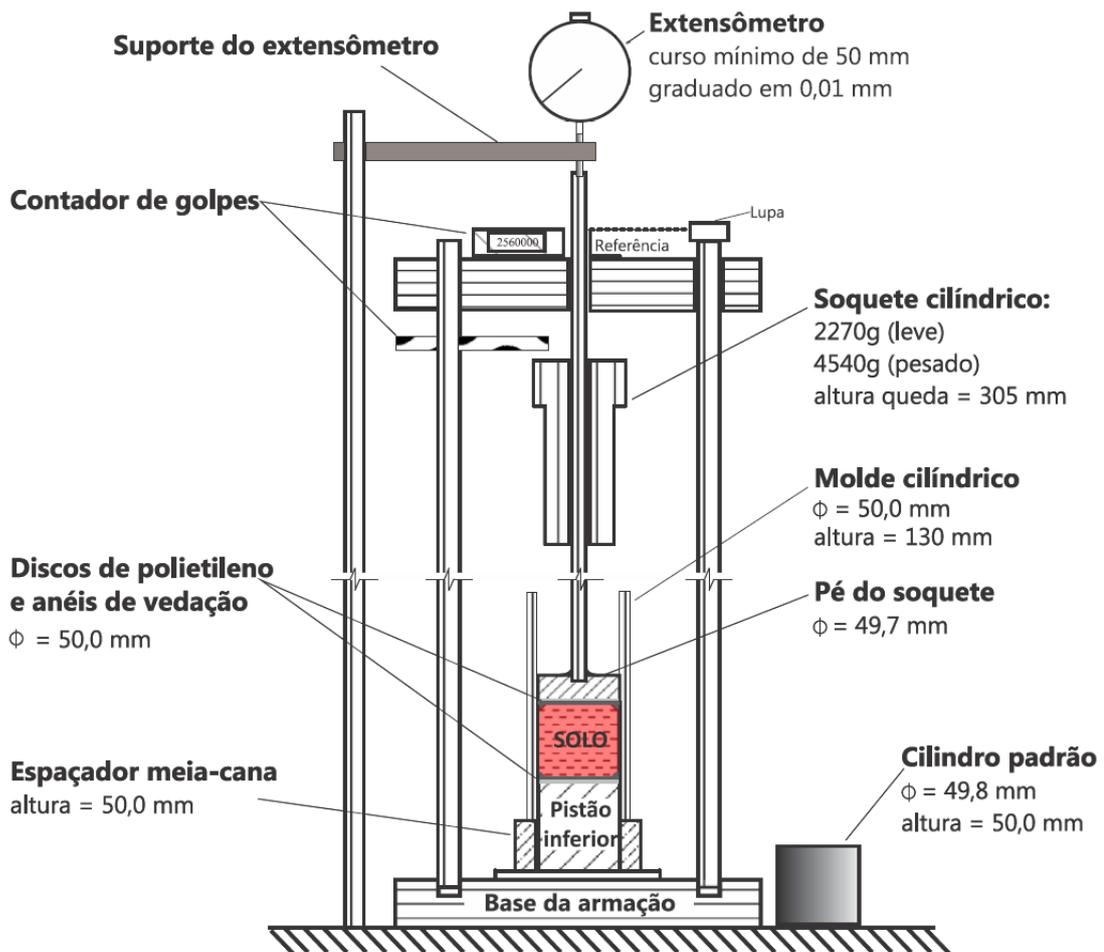


Figura 3.3 – Croqui da aparelhagem de ensaio de mini-Proctor

### 3.3.2 ENSAIO DE PERMEABILIDADE

O ensaio de permeabilidade será realizado segundo as recomendações da NBR 14545 (ABNT, 2000), em permeômetros de parede rígida, como mostra a Figura 3.4, a carga variável. Com os dados de umidade ótima e massa específica seca aparente obtidos no ensaio de compactação para cada amostra, serão moldados corpos de prova utilizando o mesmo cilindro metálico do ensaio de compactação, então poderá ser determinado o coeficiente de permeabilidade para cada amostra. Os ensaios serão realizados imediatamente após a moldagem dos corpos de prova. (COSTA, 2015).

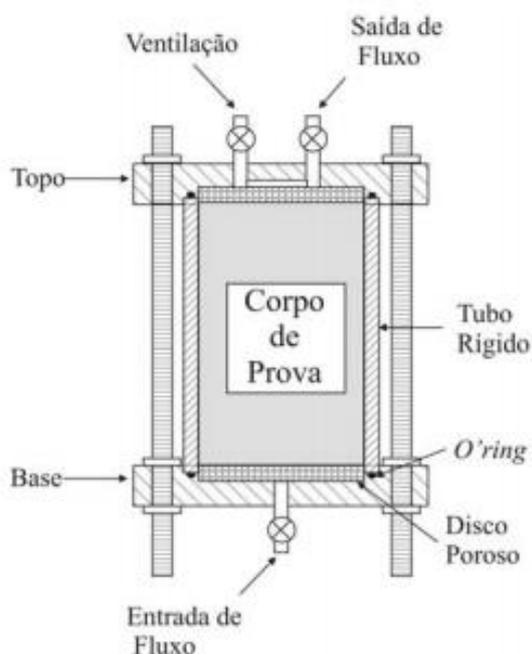


Figura 3.4 – Esquema de um permeômetro de parede Rígida (Modificado – Daniel, 1994)

### 3.3.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência a compressão simples será realizado utilizando três corpos de prova para cada amostra de solo. Estes corpos de provas serão cilíndricos, com as dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, que serão compactados na umidade ótima e na massa específica seca máxima, assim como para um ponto no ramo seco e outro no ramo úmido das curvas de compactação para cada uma das três energias de compactação estabelecida anteriormente. Os corpos de provas serão compactados a partir de cinco camada de 2 cm em uma prensa hidráulica. Após a compactação serão verificadas a massa e as dimensões dos

corpos de prova. (COSTA, 2015). A Figura 3.5 mostra o equipamento onde é realizado o ensaio.



Figura 3.5 – Equipamento do ensaio de Resistência à Compressão Simples

### 3.3.4 ENSAIO DE RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA

O ensaio de retração volumétrica terá como objetivo avaliar o comportamento do solo quando exposto as condições ambientes do laboratório. Serão moldados três corpos de prova cilíndricos para cada uma das três umidades, com 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura, para cada uma das curvas de compactação, seguindo em cada trio de amostras os parâmetros de umidade e massa específica aparente seca determinadas no ensaio de compactação. Os corpos de prova serão compactados estaticamente em uma prensa hidráulica em uma camada única de 2 cm. Os corpos de prova serão deixados expostos a secagem ao ar, sendo medidas diariamente as variações das dimensões destas amostras a fim de obter uma curva de tempo versus variação de volume até que os valores de retração se estabilizem.

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO

O solo usado neste projeto também foi estudado por Costa (2015), os resultados dos ensaios de granulometria, limites de liquidez e plasticidade e peso específico dos grãos foram obtidos de sua tese.

O ensaio de granulometria foi realizado com o uso do granulômetro a laser, com e sem o uso do ultrassom. A Figura 4.1 apresenta as curvas granulométricas do solo, para o ensaio sem o uso de ultrassom o resultado apresentou 8% das partículas com diâmetro inferior a 0,06 mm de diâmetro, já com o uso de ultrassom o solo apresentou uma maior fração de finos. A Tabela 4.1 apresenta as frações granulométricas do solo.

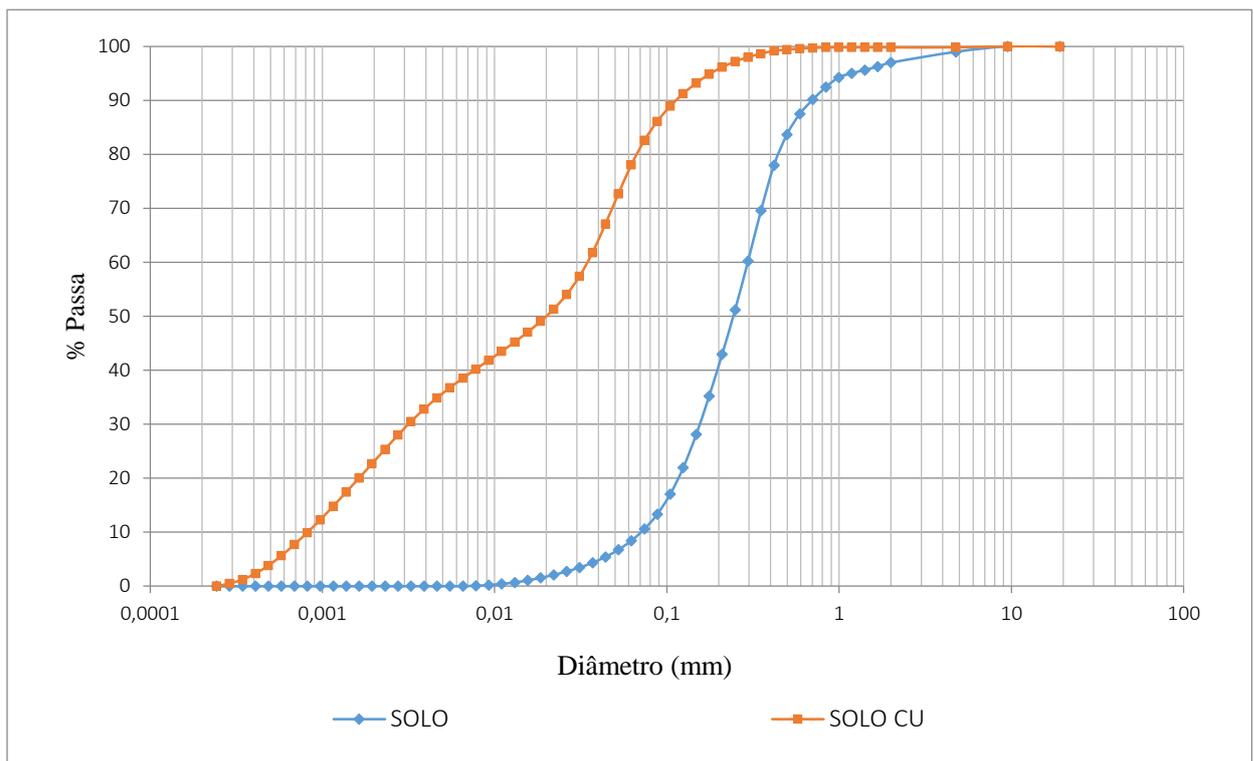


Figura 4.1 – Curva granulométrica da amostra de solo (Modificado - Costa, 2015)

Tabela 4.1 – Frações granulométricas da amostra de solo (Costa, 2015)

Faixa Granulométrica	% do material – Ensaio sem Ultrassom	% do material – Ensaio com Ultrassom
20<Pedregulho grosso<60	0,0	0,0
6<Pedregulho médio<20	0,0	0,0
2,0<Pedregulho fino<6,0	0,0	0,0
0,60<Areia grossa<2,0	12,0	0,0
0,20<Areia média<0,6	48,0	5,0
0,06<Areia fina<0,20	32,0	18,0
0,002<Silte<0,06	8,0	54,0
Argila<0,002	0,0	23,0

A partir dos ensaios de limite de liquidez e plasticidade foi determinado que o solo ensaiado possui um limite de liquidez de 52% e limite de plasticidade de 35%, com isso foi determinado que o índice de plasticidade é de 17%.

A partir dos resultados dos ensaios de consistência o solo pode ser classificado pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos como MH (silte de alta compressibilidade) a partir da carta de plasticidade (Figura 4.2).

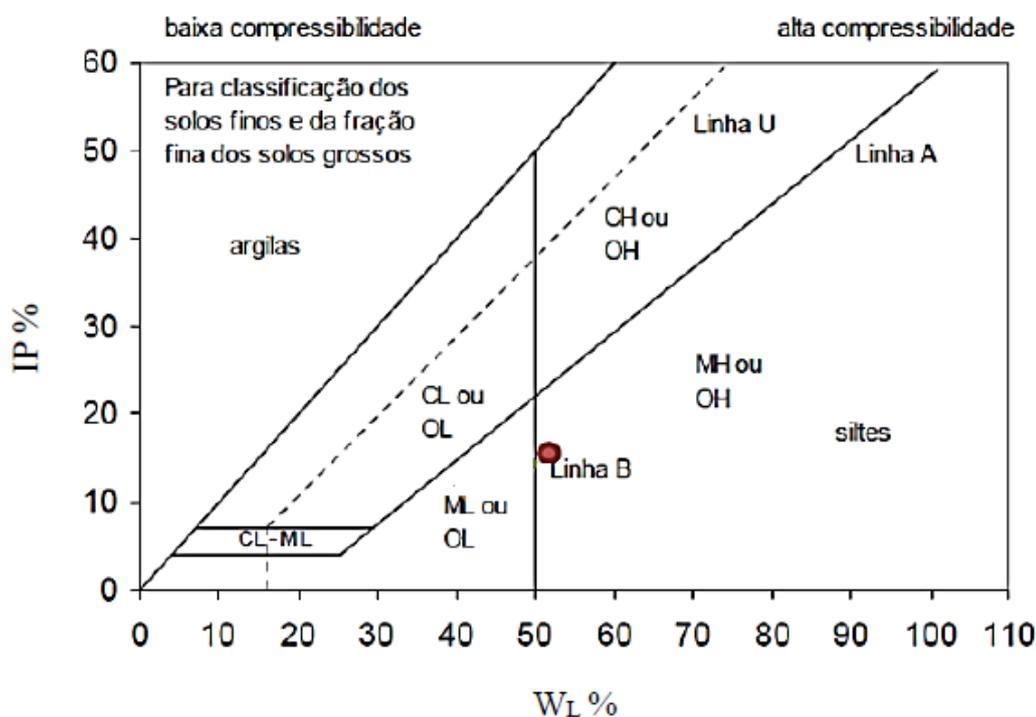


Figura 4.2 - Carta de Plasticidade com indicação do ponto correspondente ao solo (Modificado – Costa, 2015)

O peso específico dos grãos foi determinado com picnômetro convencional, sendo encontrado o valor de 26,5 kN/m<sup>3</sup>.

## 4.2 CLASSIFICAÇÃO MCT

A classificação do solo trabalhado foi feita seguindo a metodologia MCT. Seguindo-se os ensaios de Mini-MCV e Perda de Massa (Figura 4.3) foram obtidos, respectivamente, o coeficiente  $c'$  e o índice  $e'$ . O coeficiente  $c'$  está associado a argilosidade do solo e o índice  $e'$  demonstra o caráter laterítico do solo. Para os ensaios foram moldados seis corpos de prova com umidades de 18,4%, 22,5%, 24,9%, 30,6%, 33,9% e 35,1%.



Figura 4.3 – Corpos de prova durante o ensaio de perda de massa

Com o ensaio de Mini-MCV foram obtidas as curvas de deformabilidade. O valor de  $c'$  foi obtido através da inclinação da curva que tem o valor de mini-MCV de 10 e que passa pela reta da diferença de altura de 2 mm. O valor encontrado de  $c'$  foi de 2,40. As curvas podem ser vistas na Figura 4.4.

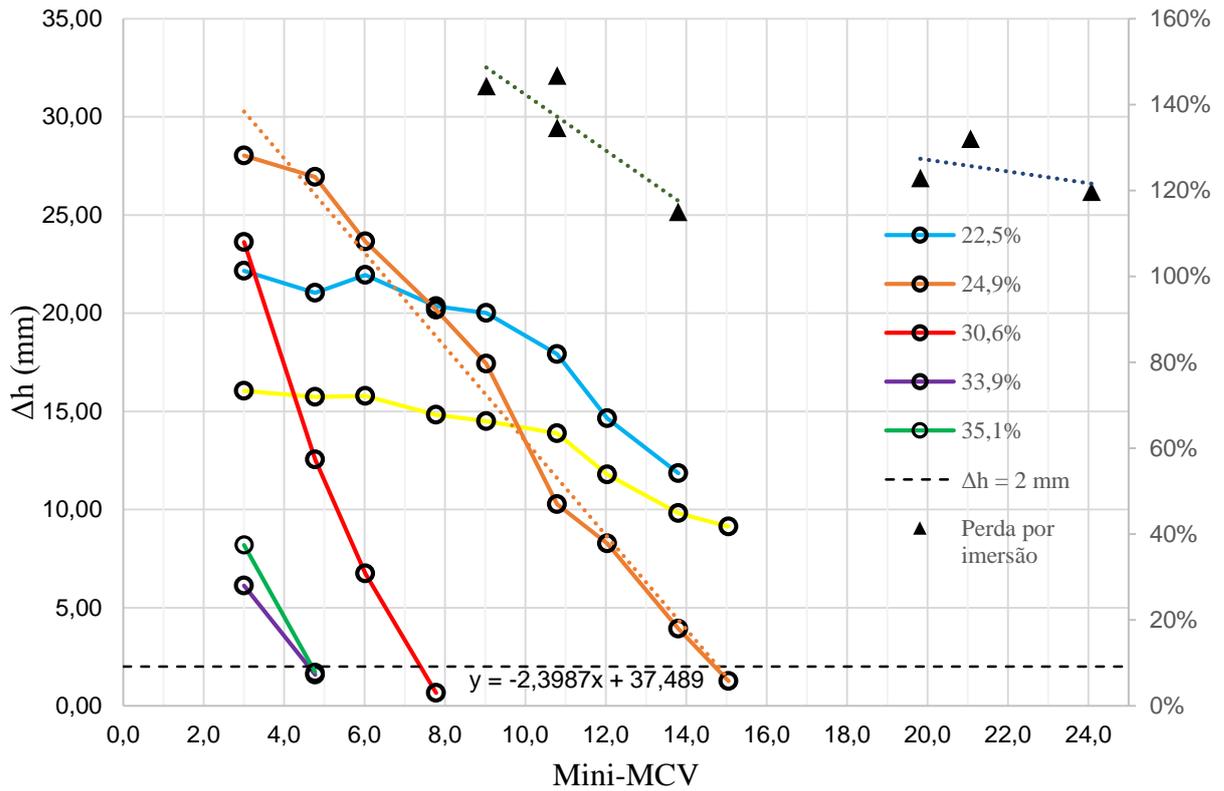


Figura 4.4 – Curvas de deformabilidade

O coeficiente  $d'$ , necessário para a obtenção do parâmetro  $e'$ , foi obtido no gráfico de massa específica aparente seca pela umidade, como mostra a Figura 4.5. O valor obtido foi de 0,062, que é a inclinação da reta do ramo seco da curva de 12 golpes.

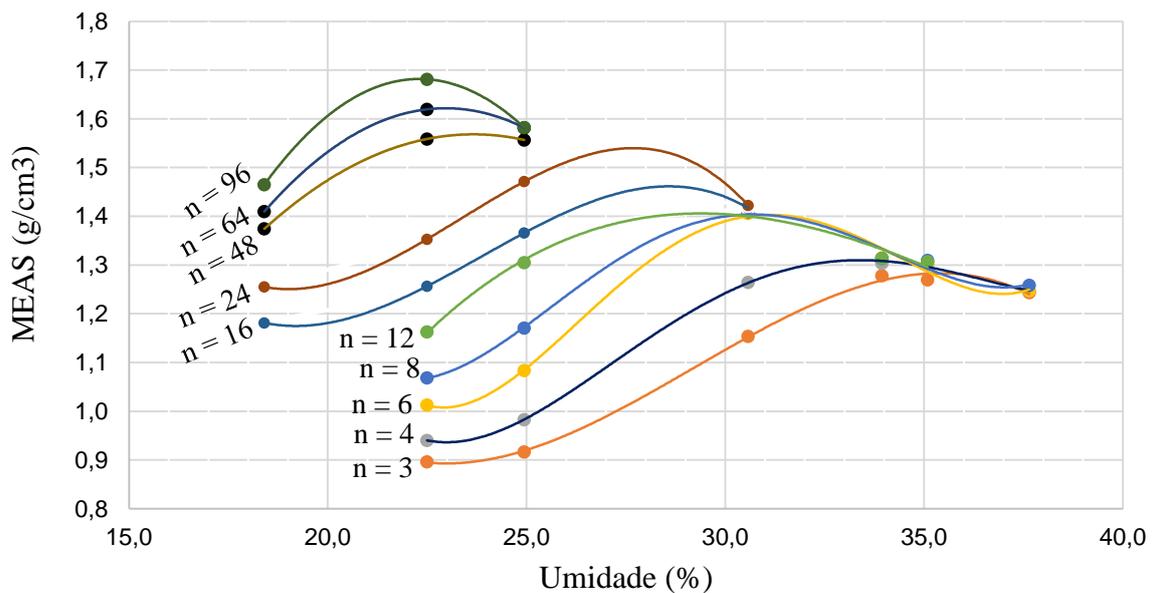


Figura 4.5 – Curvas de compactação do ensaio de mini-MCV

Consultando os valores encontrados dos coeficientes de  $c'$  igual a 2,40 e  $e'$  igual a 1,20 na carta de classificação (NOGAMI & VILIBOR) o solo estudado é classificado como NG', argila siltosa, como mostra a Figura 4.6.

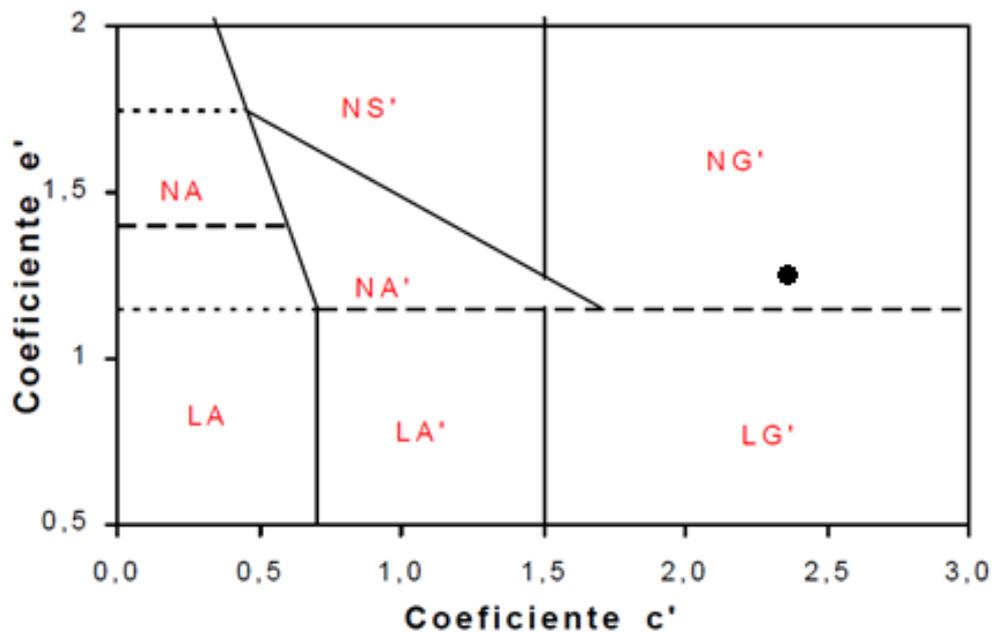


Figura 4.6 – Carta de classificação MCT com indicação do ponto correspondente ao solo

A Figura 4.7 apresenta algumas características esperadas para os solos de classificados como NG', como por exemplo, coeficiente de permeabilidade entre baixo e médio, contração entre média e elevada. Também é apresentado qual seria a classificação obtida nos grupos tradicionais, pela classificação SUCS o solo pode ser classificado como MH ou CH e pela classificação HRB o solo pode pertencer aos grupos A-6 ou A-7-5.

De acordo com Nogami & Villibor (1995), solos com classificação geotécnica NG' quando compactados nas condições de umidade ótima e massa específica aparente máxima da energia normal, apresentam características das argilas tradicionais muito plásticas e expansivas. Do ponto de vista da resiliência, apresentam, quando compactados, características bilineares em função da tensão desvio, sendo pouco dependentes da pressão de confinamento.

DESIGNAÇÃO			GRANULOMETRIAS TÍPICAS Designações do T1-71 do DER-SP						
k=caolínico s= sericítico	m=micáceo q= quartzoso		areias siltes (q,s)	areias siltosas	siltes (k,m) siltes arenosos	argilas argila arenosa argila siltosa siltes argilosos	areias	areias argilosas	argilas argila arenosa argila siltosa siltes argilosos
COMPORTAMENTO			N = Não Laterítico			L = Laterítico			
GRUPO MCT			NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
Propriedades	MINI-CBR [%]	sem imersão perda por imersão	M, E B, M	E B	M, E E	E E	E B	E, EE B	E B
	EXPANSÃO (Es)		B	B	E	M, E	B	B	B
	CONTRAÇÃO (Ct)		B	B, M	M	M, E	B	B, M	M, E
	COEF. DE PERMEABILIDADE (k)		M, E	B	B, M	B, M	B, M	B	B
	COEFICIENTE DE SORÇÃO (s)		E	B, M	E	M, E	B	B	B
Corpos de prova compactados na massa específica aparente seca máxima da energia normal			EE = Muito Elevado E = Elevado			M = Médio B = Baixo			
Utilização	Base de pavimento		n	4°	n	n	2°	1°	3°
	Reforço do subleito compactado		4°	5°	n	n	2°	1°	3°
	Subleito compactado		4°	5°	7°	6°	2°	1°	3°
	Aterro (corpo) compactado		4°	5°	6°	7°	2°	1°	3°
	Proteção à erosão		n	3°	n	n	n	2°	1°
	Revestimento primário		5°	3°	n	n	4°	1°	2°
n = não recomendado									
Grupos tradicionais obtidos de amostras que se classificam nos grupos MCT discriminados nos topos das colunas		USCS	SP SM	MS SC ML	SM, CL ML, MH	MH CH	SP SC	SC	MH ML CH
		AASHTO	A - 2	A - 2 A - 4 A - 7	A - 4 A - 5 A - 7 - 5	A - 6 A - 7 - 5 A - 7 - 5	A - 2	A - 2 A - 4	A - 6 A - 7 - 5

Figura 4.7 – Dados de características dos grupos da classificação MCT (Modificado – Nogami & Villibor, 1995)

### 4.3 COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação foi feito seguindo a metodologia mini-Proctor. Para o trabalho foi feita a compactação do solo com três energias de compactação, sendo energia modificada, normal e reduzida, então foi determinado a umidade ótima de compactação e a massa específica seca aparente para cada energia. A curva de compactação foi montada para cada energia com 5 valores de umidades.

Como era esperado, a massa específica foi maior para as maiores energias de compactação e a umidade ótima foi menor. Os dados podem ser observados na Tabela 4.2 e na Figura 4.8

Tabela 4.2 – Umidade ótima e massa específica aparente seca de cada energia de compactação

Energia	Umidade Ótima (%)	MEAS (g/cm <sup>3</sup> )
Modificada	22,1	1,34
Normal	30,3	1,40
Reduzida	33,3	1,47

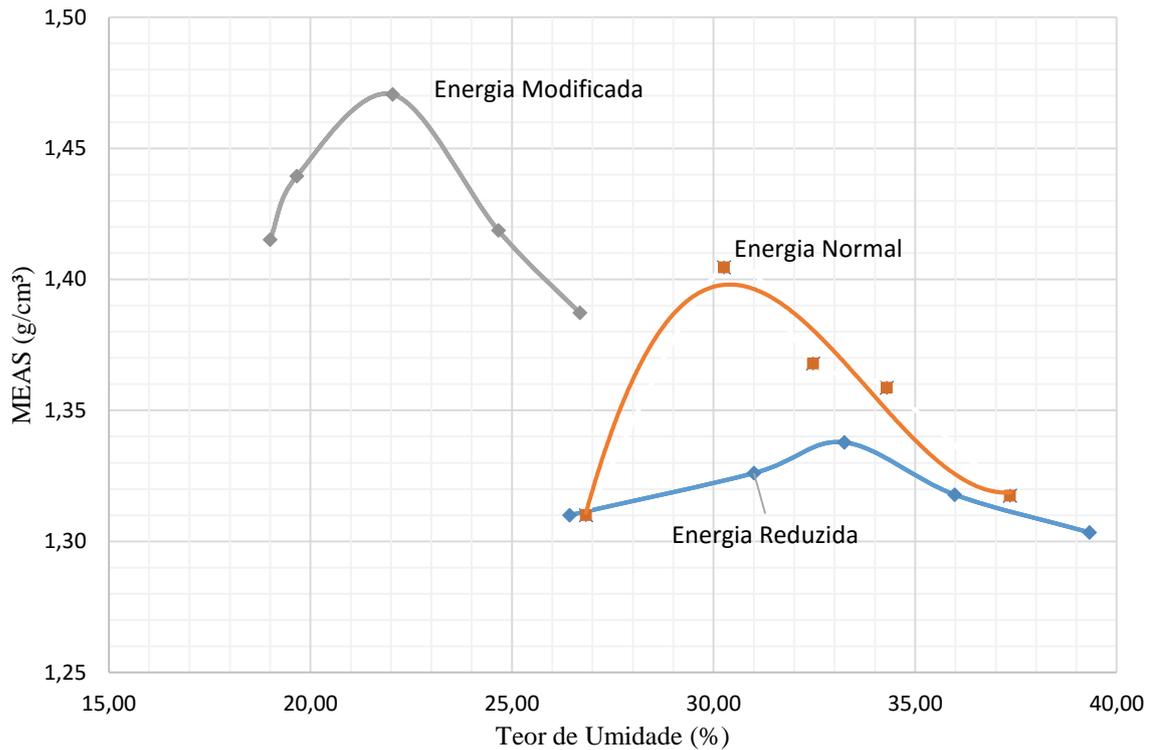


Figura 4.8 – Curva de compactação para as energias reduzida, normal e modificada

#### 4.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS E HIDRÁULICAS

As propriedades mecânicas e hidráulicas avaliadas foram a condutividade hidráulica, resistência à compressão simples e retração volumétricas do solo compactado.

Para cada um destes ensaios avaliou-se o solo compactado nas três diferentes energias de compactação, sendo que cada energia foi avaliada para a umidade ótima de compactação, um ponto no ramo seco e outro no ramo úmido, totalizando três pontos avaliados para cada energia de compactação.

#### 4.4.1 PERMEABILIDADE

O ensaio de permeabilidade foi feito de acordo com a NBR 14545 (ABNT, 2000). A figura 4.9 apresenta o ensaio sendo realizado.



Figura 4.9 – Ensaio de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede rígida com carga variável

Foi possível observar que os corpos de prova compactados com uma maior energia de compactação tiveram uma menor condutividade hidráulica ( $k$ ). Comparando os três pontos da mesma energia de compactação nota-se que a condutividade hidráulica diminui com o aumento de teor de umidade do solo (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Valores obtidos de permeabilidade ( $k$ )

Energia Reduzida		Energia Normal		Energia Modificada	
Umidade (%)	$k$ (m/s)	Umidade (%)	$k$ (m/s)	Umidade (%)	$k$ (m/s)
31,00	$3,78 \cdot 10^{-8}$	26,84	$2,84 \cdot 10^{-9}$	19,66	$2,87 \cdot 10^{-9}$
33,25	$3,16 \cdot 10^{-8}$	30,26	$2,36 \cdot 10^{-9}$	22,04	$2,28 \cdot 10^{-9}$
36,00	$3,29 \cdot 10^{-8}$	34,3	$2,45 \cdot 10^{-9}$	24,66	$2,19 \cdot 10^{-9}$

Como foi mostrado por Daniel (1984) o coeficiente de permeabilidade é maior para os menores teores de umidade, no teor de umidade ótima sofre um grande decréscimo e para as umidades maiores que a ótima o coeficiente volta a aumentar. Este comportamento pode ser observado no solo compactado para as compactações feitas na energia reduzida e normal, onde o coeficiente de permeabilidade teve uma grande diminuição entre o ponto do ramo seco e o de teor ótimo de umidade, no entanto teve um leve aumento entre o teor ótimo de umidade o ponto do ramo úmido (Figuras 4.10, 4.11). Para a energia modificada ainda houve decréscimo do coeficiente de permeabilidade para o ponto ensaiado com o teor de umidade maior do que o ótimo (Figura 4.12).

De acordo com Nogami & Villibor (1995) os solos lateríticos com estrutura compactada apresentam variação bastante acentuada da permeabilidade ao longo da curva de compactação, pois a resistência relativamente grande dos agregados argilosos naturais, ou resultantes da própria manipulação do solo no laboratório e no campo são refletidos na permeabilidade. Já os solos não lateríticos em sua estrutura compactada, de um modo em geral, obedece ao que é observado para os solos não tropicais, sendo que nas variedades menos intemperizadas as previsões da permeabilidade fiquem dificultadas pela resistência muito variada de suas diversas partes, consequente a graus diferentes de intemperização.

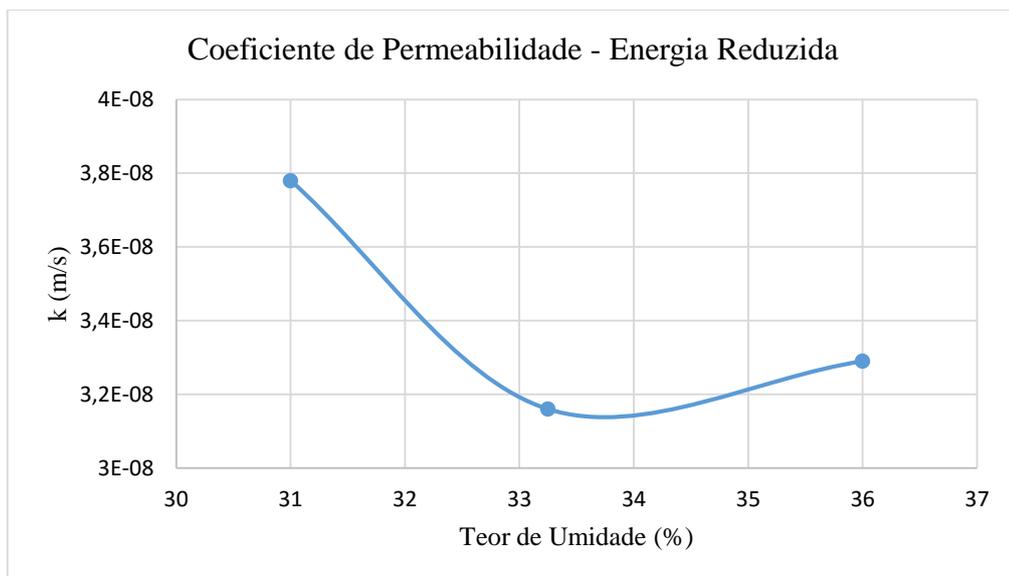


Figura 4.10 – Variação do coeficiente de permeabilidade na energia reduzida

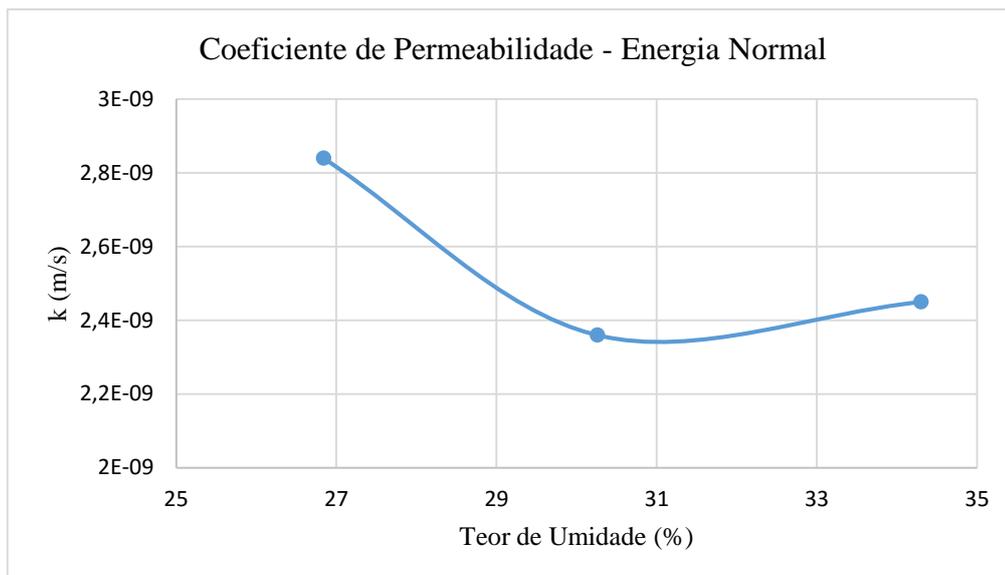


Figura 4.11 – Variação do coeficiente de permeabilidade na energia normal

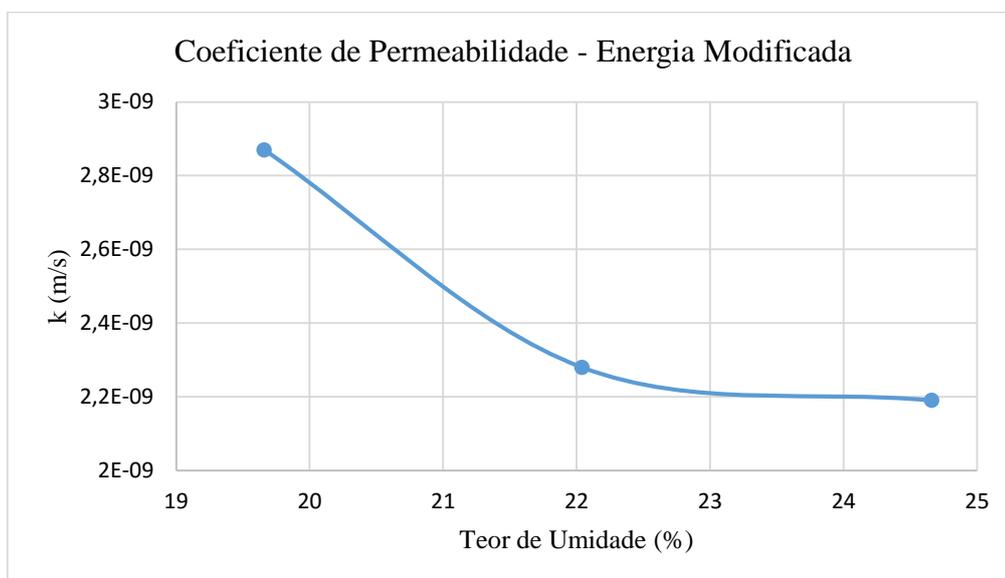


Figura 4.12 – Variação do coeficiente de permeabilidade na energia modificada

#### 4.4.2 RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA

O ensaio de retração volumétrica foi realizado para que fosse observado a variação volumétrica do solo compactado quando exposto a temperatura ambiente. Para isto as amostras foram moldadas em discos de 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura com as umidades e massas específicas correspondentes a um ponto do ramo seco e úmido e da umidade ótima de compactação. As umidades usadas para cada energia e a retração correspondente é apresentada na Tabela 4.4. As medições foram feitas durante sete dias, pois foi o tempo em

que a variação do volume se estabilizou. A Figura 4.13 mostra os corpos de prova ao fim do ensaio.



Figura 4.13 – Corpos de prova ao fim do ensaio de retração volumétrica

Tabela 4.4 – Valores obtidos de retração volumétrica para cada um dos pontos ensaiados

Energia Reduzida		Energia Normal		Energia Modificada	
w (%)	Retração (%)	w (%)	Retração (%)	w (%)	Retração (%)
31,00	-4,44	26,84	-4,41	19,66	-3,11
33,25	-5,31	30,26	-4,54	22,04	-3,41
36,00	-5,68	34,3	-4,91	24,66	-4,12

Para todos os corpos de prova a maior variação do volume ocorreu no primeiro dia tendo uma menor diminuição a cada dia que passava. As maiores variações ocorreram para os pontos ensaiados da energia reduzida, sendo que a variação volumétrica aumentou de acordo com o aumento do teor de umidade, sendo isto também observado quando comparado as diferentes energias, pois os pontos da energia modificada, que possuem os menores teores de umidade, foram os que sofreram menor variação.

De acordo com os critérios estabelecidos por Daniel e Wu (1993), a única energia de compactação que atendeu ao critério de variação máxima de 4% foi a energia modificada para compactações feita na umidade ótima e no ramo seco da curva de compactação. As variações volumétricas para cada uma das energias podem ser vistas na Figura 4.14, 4.15 e 4.16.

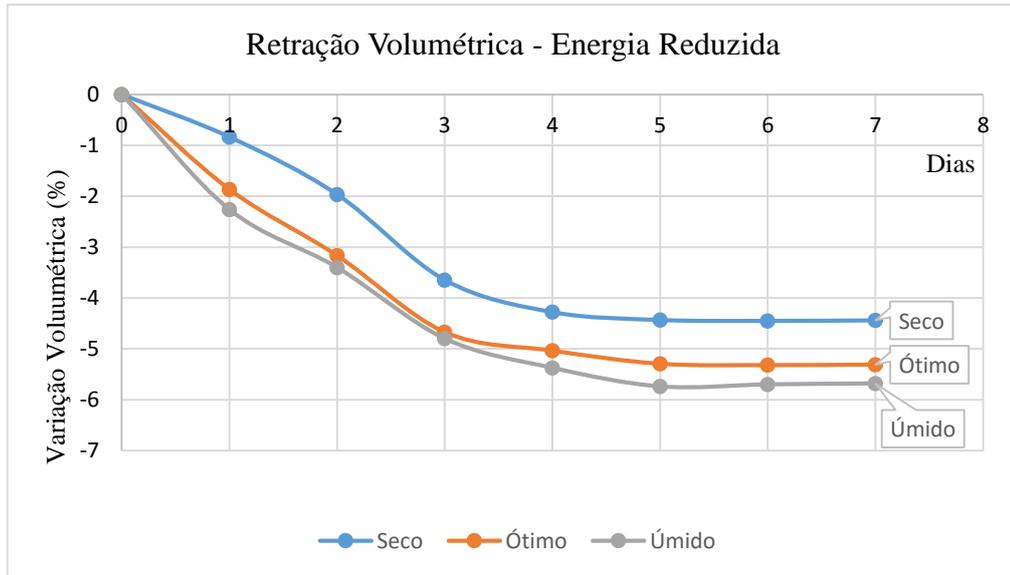


Figura 4.14 – Variação volumétrica ao longo dos dias dos pontos da energia reduzida

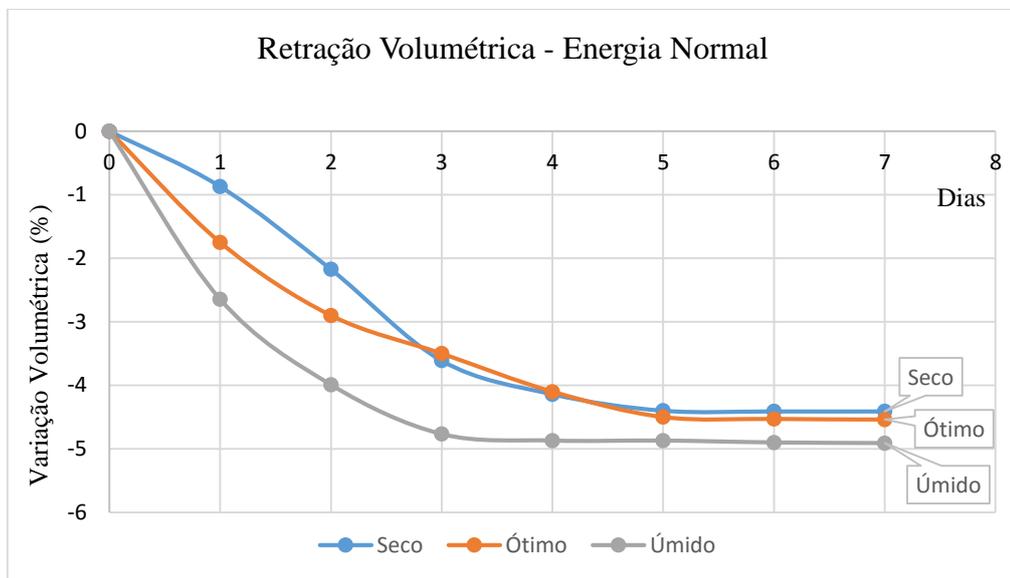


Figura 4.15 – Variação volumétrica ao longo dos dias dos pontos da energia normal

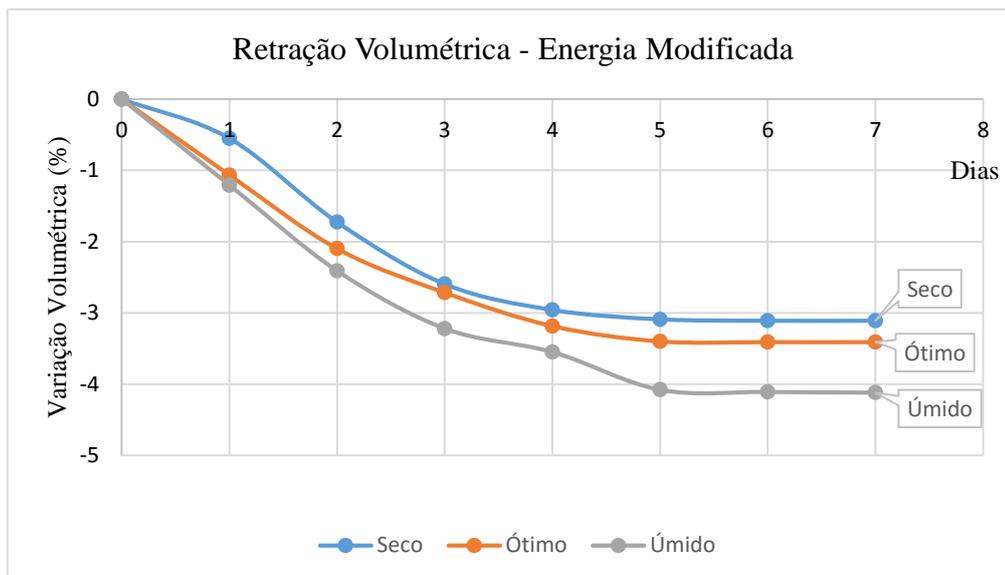


Figura 4.16 – Variação volumétrica ao longo dos dias dos pontos da energia modificada

De acordo com Nogami & Villibor (1995), os solos lateríticos compactados não apresentam peculiaridades nítidas no que se refere à contração, conseqüentemente, quanto mais argilosos, mais contráteis são, apresentando, contudo, expansibilidade baixa. Já os solos não lateríticos compactados, constituídos de elevada porcentagem de argila, apresentam geralmente características de contração similares aos correspondentes granulométricos dos solos não tropicais. Os siltes e solos siltosos micáceos/ou caoliníticos de origem saprolítica, podem apresentar baixa contração, mesmo que sejam expansivos, quando compactados e imersos na água. Em casos extremos de solos saprolíticos constituídos de elevada porcentagem de siltes micáceos ou caoliníticos, poderá haver expansão por perda de umidade.

#### 4.4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

O ensaio de resistência a compressão simples foi realizado com os corpos de provas compactados de tal forma que fosse obtido a mesma umidade e massa específicas aparente seca definida para os três pontos (ramo seco, ótimo e úmido) definidos a partir das curvas de compactação. Foram ensaiados um corpo de prova para cada ponto de cada energia de compactação. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.5 e nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19

Tabela 4.5 – Valores obtidos de resistência à compressão simples

Energia Reduzida		Energia Normal		Energia Modificada	
w (%)	RCS (kPa)	w (%)	RCS (kPa)	w (%)	RCS (kPa)
31,00	60,0	26,84	258,9	19,66	424,1
33,25	49,2	30,26	120,2	22,04	331,0
36,00	32,3	34,3	73,2	24,66	228,2

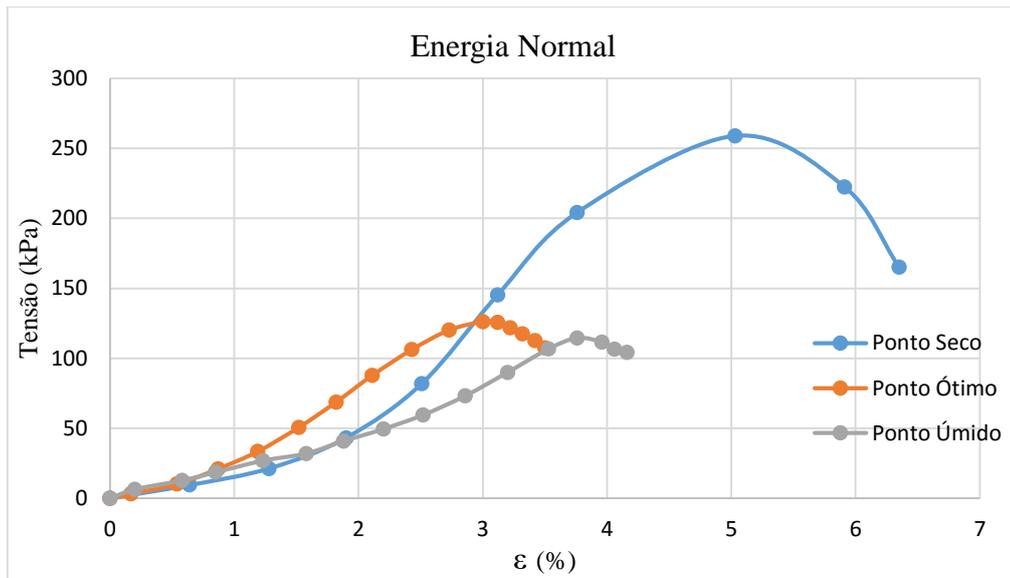


Figura 4.17 – Gráfico de tensão x deformação dos pontos da energia normal

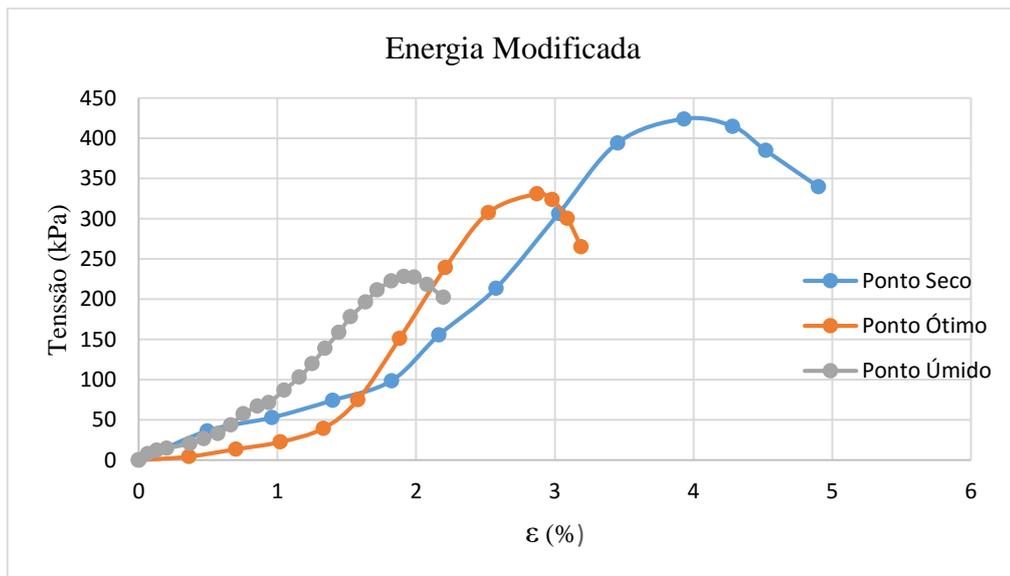


Figura 4.18 – Gráfico de tensão x deformação dos pontos da energia modificada

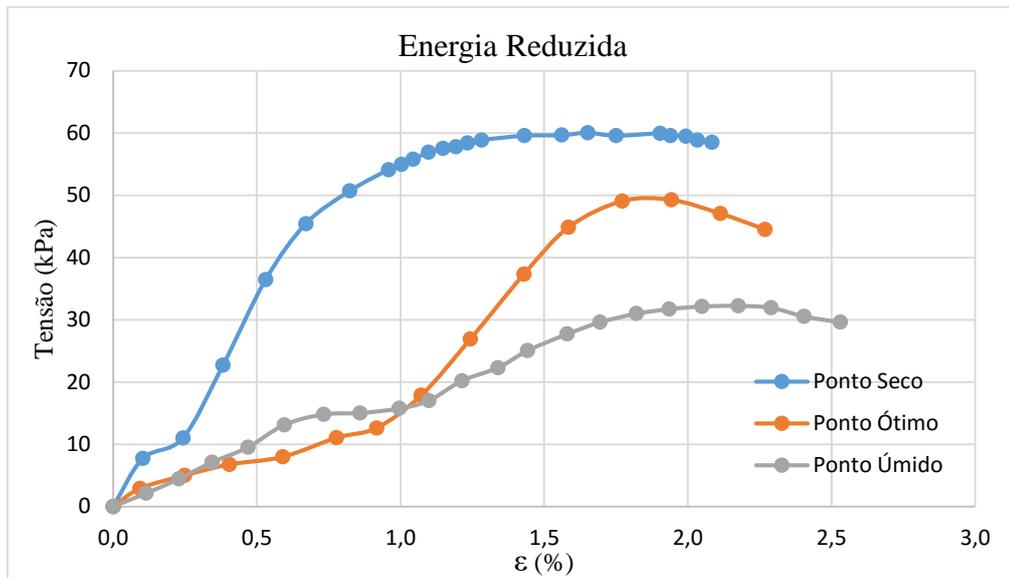


Figura 4.19 – Gráfico de tensão x deformação dos pontos da energia reduzida

A análise dos resultados mostra que resistência à compressão simples decresce com o aumento do teor de umidade. Comparando as diferentes energias de compactação nota-se que a diferença, percentualmente, entre as resistências à compressão para os diferentes aumenta com o aumento da energia de compactação (Figura 4.20).

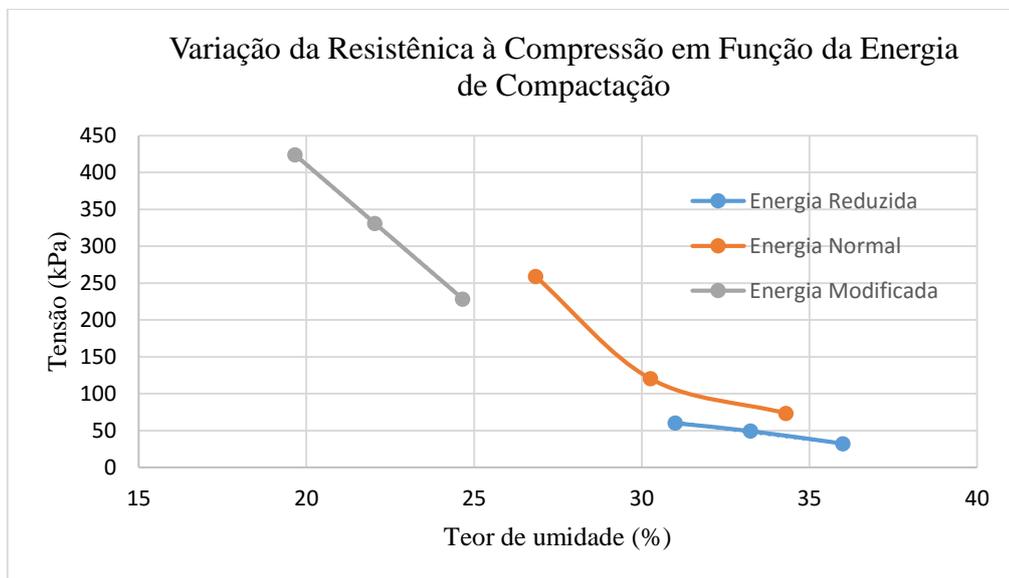


Figura 4.20 – Variação da resistência à compressão simples em função da energia de compactação

Quanto ao critério de resistência à compressão simples estabelecido por Daniel & Wu (1993), que deve ser maior que 200 kPa, todos os pontos da energia modificada e somente o ponto do ramo seco da energia normal atendeu ao critério.

## CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Neste capítulo é avaliado se o solo estudado atende aos critérios estabelecidos pela metodologia de Daniel & Wu (1993) e outros critérios gerais para o uso em camadas de coberturas de aterros sanitários. A avaliação dos critérios foi feita a partir da metodologia MCT para classificação do solo e avaliação das propriedades mecânicas e hidráulicas.

### 5.1 RECOMENDAÇÕES GERAIS

Atualmente no Brasil não existem normas com aspectos técnicos específicos quanto as camadas de cobertura de aterros sanitários, no entanto é possível encontrar recomendações como o da CETESB (1993), que faz recomendações quanto aos limites de consistência, granulometria e classificação, US.EPA (2004) e O Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (Monteiro *et al.*, 2001).

Analisando o solo estudado pelos critérios da CETESB (1993) a classificação do solo não atende ao recomendado, pois pela classificação SUCS foi definido como MH, sendo que os tipos recomendados são CL, CH, SC ou OH. O solo atende as recomendações de limite de liquidez maior que 30% e índice de plasticidade mínimo de 15%. Quanto a permeabilidade, o solo não atendeu ao requisito de coeficiente de permeabilidade inferior a  $1 \times 10^{-9}$  m/s.

Outras recomendações que podem ser observadas são as propostas pela US.EPA (2004). Um dos principais aspectos é a diferenciação entre o critério de permeabilidade entre os aterros sanitários destinados a resíduos sólidos urbanos e resíduos perigosos, que devem ser, respectivamente, inferiores a  $1 \times 10^{-7}$  m/s e  $1 \times 10^{-9}$  m/s. Logo, o solo se adequaria para ser usado em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.

Já o Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (Monteiro *et al.*, 2001) diz que a permeabilidade das camadas de cobertura deve ser inferior a  $1 \times 10^{-8}$  m/s.

### 5.2 METODOLOGIA DE DANIEL & WU

A metodologia desenvolvida por Daniel & Wu (1993) para camadas de cobertura de aterros sanitários apresenta três parâmetros que devem ser atendidos para que as camadas funcionem de forma adequada. Os três critérios são permeabilidade menor que  $1 \times 10^{-9}$  m/s, retração volumétrica menor do que 4% e resistência à compressão simples superior a 200 kPa.

Foram realizados ensaios no solo estudado com a finalidade de se avaliar se o mesmo atende aos critérios.

Em relação ao critério de permeabilidade, o solo não atingiu em nenhuma das energias de compactação o valor mínimo necessário, sendo que o menor valor de permeabilidade obtido foi de  $2,28 \cdot 10^{-9}$  m/s para o corpo de prova compactado com a umidade ótima da energia modificada de compactação.

Para o critério de retração volumétrica o solo ensaiado também não atendeu ao requisito de forma eficiente, pois somente o ponto do ramo seco e da umidade ótima da energia modificada tiveram uma retração abaixo do valor máximo de 4%, sendo obtidos os valores de 3,11% e 3,41%.

O critério o qual o solo teve um melhor desempenho foi o de resistência à compressão simples. A metodologia de Daniel & Wu (1993) estabelece um valor mínimo de 200 kPa, sendo que os três pontos ensaiados da energia modificada (424,1, 331 e 229,2 kPa) e o ponto do ramo seco da umidade ótima da energia normal (258,9 kPa) obtiveram um valor superior ao determinado.

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que o solo não atende a todos os parâmetros estabelecidos pela metodologia proposta, no entanto a compactação do solo com a energia modificada foi a que obteve resultados mais satisfatórios, logo recomenda-se que caso haja a necessidade de se usar o solo estudado em uma camada de cobertura de aterro sanitário, que a compactação seja feita com os valores equivalente a energia modificada.

### 5.3 METODOLOGIA MCT

A aplicação da metodologia MCT para obtenção dos critérios estabelecidas por Daniel & Wu (1993) se mostrou com bons resultados para o caso estudado, pois foi desenvolvido a princípio para obras de pavimentação que assim como camadas de cobertura deve haver baixa permeabilidade e baixa retração volumétrica. No entanto sabe-se que é necessário mais estudos com solos com diferentes classificações para que se consiga ter uma avaliação geral na metodologia MCT dentro do que foi proposto por Daniel & Wu . Dentro do programa de ensaios propostos por Nogami & Villibor (1995) foi possível determinar a classificação do solo, curva de compactação, coeficiente de permeabilidade e retração volumétrica.

Classificar o solo pela metodologia MCT tem grande aplicabilidade aos solos brasileiros, pois foi desenvolvida para solos tropicais. Outro aspecto de grande relevância se

dá ao fato da classificação MCT ser baseada em propriedades mecânicas e hidráulicas de solos compactados.

#### 5.4 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho e do aprendizado ao longo da realização dos ensaios, sugere-se algumas possíveis pesquisas futura.

- Aplicar a metodologia em outros tipos de solos, principalmente um solo laterítico argiloso, LG’;
- Analisar as fissuras, por secagem e umedecimento, utilizando programas para quantificação dessas fissuras;
- Utilizar outros ensaios para aprimoramento da zona de aceitação do solo, como: resistência ao cisalhamento e adensamento do solo.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984-a, 13p.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984-b, 6p.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984-c, 3p.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grãos de Solo que Passam na #4,8mm – Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984-d, 8p.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8.419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: 1984, 7p.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986, 10p.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.896: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997, 12p.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14545: Solo – Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000, 3p.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004, 71p.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama de resíduos sólidos no Brasil - 2014. São Paulo: ABRELPE. Disponível em: <[http://www.abrelpe.org.br/panorama\\_envio.cfm?ano=2014](http://www.abrelpe.org.br/panorama_envio.cfm?ano=2014)>. Acesso em: jan/2016.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Estimativas dos custos para viabilizar a universalização da destinação adequada de resíduos sólidos no Brasil. São Paulo, 2015, 91 p.
- ALBRECHT, B. A. & BENSON, C. H., (2001). *Effects of desiccation on compacted natural clays*. J. Geoenviron. Engrg., ASCE, 127(1), 67-75
- ACAR, Y. & OLIVIERI, I., (1989). *Pore fluids effects on the fabric and hydraulic conductivity of laboratory-compacted clay*. Transp. Res. Rec. 1219, Transportation Research Board, Washington, D.C., 144-159

BENSON, C. H. & DANIEL, D. E., (1990). *Influence of clods on hydraulic conductivity of compacted clay*. J. Geotech. Engrg., ASCE, 116(8), 1231-1248.

BENSON, C., ZHAI, H., and WANG, X. (1994b). *Estimative the hydraulic conductivity of compacted clay liners*. J. Geotech. Engrg., ASCE, 120(2), 366-387.

BENSON, C. H., DANIEL, D. E. & BOUTWELL, G. P., (1999). J. Geotech. Engrg, ASCE, 111(4), P.465-478.

BOUTWEEL, G. P. & HEDGES, C. (1989). *Evaluation of waste-retention liners by multivariate statistics*. Proc., Twelfth Int. Conf. On Soil Mech. and. Foundation Engrg., Rio de Janeiro, Brazil, 2, 815-818.

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; e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305). Acesso em: jan. 2016.

CATAPRETA, C. A. A. (2008). Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos Universidade Federal de Minas Gerais, MG, 316p.

CETESB (1993). Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Resíduos Sólidos Industriais. 2ª ed. São Paulo, SP.

COSTA, C.M.C. (2015). Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-108/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 163 p.

DANIEL, D. E., (1984). *Predicting hydraulic conductivity of clay liners*. J. Geotech. Engrg., ASCE, 110(2), 285-300. United Kingdom, 1993. Anais. v.3, p. 1275 – 1292.

DANIEL, D. E. (1994). *State of the art: laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils*. ASTM/STP 1142, Philadelphia, 30-78.

DANIEL, D.E.; WU, Y. K. (1993). *Compacted clay liners and cover for arid sites*. In: Journal of Geotechnical Engineering, 119 (2): p. 223-237.

DNER-ME-228. (1994). Solos - compactação em equipamento miniatura, São Paulo, SP, 14 p.

DNER-ME-258. (1994). Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV. São Paulo, SP, 14p.

GURJÃO, C.M.C. (2005). Estimativa de Propriedades Geoambientais de Camadas Impermeabilizantes de Solos Tropicais. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-029/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 257 p.

HUSE, K. (2007). Estudo da influência da adição de bentonita em um solo areno-siltoso para uso como cobertura de aterros. Dissertação (Mestrado). COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 126p.

KLEPPE, J., & OLSON, R. (1985). *Desiccation cracking of soil barrier*. Hydraulic barriers in soil and rock, STP 874, ASTM, Philadelphia, p.263-275.

LAMBE, T.W., WHITMAN, R.V. (1969). *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, 553 p

MACAMBIRA, I.Q. (2002). Comportamento Hidráulico de Solos Lateríticos Para Uso como Barreiras Impermeáveis. São Carlos. Dissertação de Mestrado. 123p. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

MITCHELL, J. K., HOOPER, D.R., CAMPANELLA, R.G. (1965). *Permeability of compacted clay*. In: *Journal soil mechanics and foundations div*, 91 (SM4): p. 41-65.

MITCHELL, J. K., (1976). *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley & Sons, Inc., New York.

MONTEIRO, J. P.; FIGUEIREDO, C. M.; MAGALHÃES, A. F.; MELO, M. F.; BRITO, J. X.; ALMEIDA, T. F.; MANSUR, G. L., *Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos Sólidos*, Rio de Janeiro, IBAM, 2001.

MUNDELL, J. A. & BAILEY, B. (1985). *The design and testing of compacted clay barrier layer to limit percolation through landfill cover*. Hydraulic barriers in soil and rock, Johnson et al., eds., Special Technical Publication 874, ASTM, Philadelphia, Pa., 246-262.

NOGAMI, J. S. & VILLIBOR, D. F., (1981). Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. In: *Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia*. Rio de Janeiro, 1981. Anais. Rio de Janeiro, COOPE/UFRJ – CNPq – ABMS, p. 30 – 41.

NOGAMI, J. S. & VILLIBOR, D. F., (1985). *Additional considerations about a New Geotechnical Classification for Tropicals Soils*. Tropical LS'85, ABMS.

NOGAMI, J.S. e VILLIBOR, D.F. (1994). Identificação expedita dos grupos de classificação MCT para solos tropicais. 10º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, ABMS, Foz do Iguaçu, PR, 4: 293-1300.

NOGAMI, J. S. & VILLIBOR, D. F., (1995). *Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos*. São Paulo, Villibor. 213p.

PARSONS, A. W., (1976). *The Rapid Measurement of the Moisture Condition of Earthwork Material*. Transport and Road research Laboratory, Report nº 750.

PESSOA, F.H.C. (2004). Análises dos solos de Urucu para Fins de Uso Rodoviário. Dissertação de Mestrado, Publicação nº G. DM-117A/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 151 p.

PIEDADE JR., C. R. C (2003). Análise da Potencialidade de Alguns Solos Não Lateríticos para Utilização em Barreiras Impermeáveis. São Carlos. Dissertação de Mestrado. 123p. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

PINTO, C. S. (2000). Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas. São Paulo: Oficina de Textos, 247p.

SLU DF. Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal. Relatório dos Serviços de Limpeza Urbana e Manejo dos Resíduos Sólidos do Distrito Federal 2015. Brasília: SLU. Disponível em: <<http://www.slu.df.gov.br/images/PDF/relatoriofinal.pdf>>. Acesso em: junho/2016.

## ANEXOS

### A. Ensaio de compactação mini-Proctor

Energia Reduzida					
Umidade (%)	26,43	31,00	33,25	35,99	39,32
Diâmetro (mm)	49,60	49,61	49,79	49,81	49,65
Altura (mm)	57,00	45,86	50,40	50,88	46,93
Massa (g)	182,74	153,99	174,92	177,67	165,00
Volume (cm <sup>3</sup> )	110,14	88,65	98,13	99,14	90,86
Msc (g)	144,54	117,55	131,28	130,65	118,43
MEAS (g/cm <sup>3</sup> )	1,31	1,33	1,34	1,32	1,30

Energia Normal					
Umidade (%)	26,84	30,26	34,30	37,36	39,47
Diâmetro (mm)	49,86	50,18	49,35	49,93	49,70
Altura (mm)	52,50	46,15	51,20	47,74	45,73
Massa (g)	170,30	166,97	178,68	169,15	165,73
Volume (cm <sup>3</sup> )	102,51	91,27	97,93	93,47	88,72
Msc (g)	134,27	128,18	133,05	123,15	118,82
MEAS (gm/cm <sup>3</sup> )	1,31	1,40	1,36	1,32	1,34

Energia Modificada					
Umidade (%)	19,00	19,66	22,04	24,66	26,68
Diâmetro (mm)	49,63	50,28	50,18	49,43	49,63
Altura (mm)	49,34	47,00	45,80	50,81	47,80
Massa (g)	160,76	160,72	162,58	172,46	162,51
Volume (cm <sup>3</sup> )	95,46	93,31	90,59	97,52	92,47
Msc (g)	135,10	134,31	133,22	138,34	128,28
MEAS (gm/cm <sup>3</sup> )	1,42	1,44	1,47	1,42	1,39

## B. Ensaio de Variação Volumétrica

Energia Reduzida						
Dias	Ponto Seco		Ponto Ótimo		Ponto Seco	
	Volume (mm <sup>3</sup> )	Variação (%)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Variação (%)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Variação (%)
0	38131,1	0,00	38288,2	0,00	37542,0	0,00
1	37812,4	-0,84	37573,6	-1,87	36693,0	-2,26
2	37381,7	-1,97	37075,6	-3,17	36265,2	-3,40
3	36740,5	-3,65	36499,5	-4,67	35740,2	-4,80
4	36500,0	-4,28	36359,9	-5,04	35524,3	-5,37
5	36441,1	-4,43	36261,4	-5,29	35387,4	-5,74
6	36434,2	-4,45	36251,2	-5,32	35402,1	-5,70
7	36438,1	-4,44	36255,1	-5,31	35409,6	-5,68

Energia Normal						
Dias	Ponto Seco		Ponto Ótimo		Ponto Seco	
	Volume (mm <sup>3</sup> )	Variação (%)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Variação (%)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Variação (%)
0	38554,9	0,00	37586,1	0,00	38632,2	0,00
1	38218,5	-0,87	36928,3	-1,75	37610,8	-2,64
2	37716,8	-2,17	36496,1	-2,90	37090,8	-3,99
3	37162,7	-3,61	36270,6	-3,50	36790,6	-4,77
4	36958,8	-4,14	36045,1	-4,10	36750,7	-4,87
5	36858,9	-4,40	35894,7	-4,50	36750,7	-4,87
6	36854,6	-4,41	35883,4	-4,53	36739,2	-4,90
7	36854,6	-4,41	35879,7	-4,54	36735,4	-4,91

Energia Modificada						
Dias	Ponto Seco		Ponto Ótimo		Ponto Seco	
	Volume (mm <sup>3</sup> )	Variação (%)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Variação (%)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Variação (%)
0	37944,8	0,00	39126,1	0,00	38424,2	0,00
1	37736,1	-0,55	38709,6	-1,06	37960,5	-1,21
2	37290,0	-1,73	38305,1	-2,10	37498,6	-2,41
3	36959,9	-2,60	38063,6	-2,72	37186,9	-3,22
4	36822,3	-2,96	37880,1	-3,18	37060,1	-3,55
5	36772,3	-3,09	37795,8	-3,40	36856,5	-4,08
6	36764,7	-3,11	37791,9	-3,41	36845,0	-4,11
7	36764,7	-3,11	37791,9	-3,41	36841,1	-4,12

C. Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Energia Reduzida					
Ponto Seco		Ponto Ótimo		Ponto Úmido	
Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7,70	0,10	2,89	0,09	2,11	0,11
11,01	0,24	4,99	0,25	4,44	0,23
22,71	0,38	6,75	0,40	7,08	0,34
36,45	0,53	7,97	0,59	9,52	0,47
45,42	0,67	11,04	0,78	13,11	0,60
50,68	0,82	12,62	0,92	14,80	0,73
54,97	1,00	17,88	1,07	15,75	1,00
56,92	1,10	26,90	1,24	17,02	1,10
57,51	1,15	37,33	1,43	20,20	1,21
58,38	1,23	44,86	1,59	25,06	1,44
58,87	1,28	49,07	1,77	27,70	1,58
59,55	1,43	49,24	1,94	29,61	1,69
59,65	1,56	47,05	2,11	30,98	1,82
59,55	1,75	44,51	2,27	32,14	2,05
59,94	1,90			32,25	2,18
59,55	1,94			31,93	2,29
59,45	1,99			30,56	2,40
58,87	2,03			29,61	2,53

Energia Normal					
Ponto Seco		Ponto Ótimo		Ponto Úmido	
Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9,49	0,64	3,29	0,17	6,47	0,17
21,33	1,28	10,16	0,54	12,78	0,54
43,23	1,90	21,10	0,87	18,65	0,87
81,97	2,51	33,48	1,19	26,89	1,19
145,30	3,12	50,71	1,52	32,05	1,52
204,14	3,76	68,70	1,82	40,90	1,82
258,89	5,03	87,77	2,11	49,49	2,11
222,49	5,91	106,25	2,43	59,56	2,43
165,21	6,35	120,18	2,73	73,23	2,73
		126,18	3,00	89,97	3,00
		125,60	3,12	106,72	3,12
		121,83	3,22	114,50	3,22
		117,47	3,32	111,61	3,32

		112,64	3,42	106,61	3,42
		107,41	3,50	104,18	3,50

Energia Modificada

Ponto Seco		Ponto Ótimo		Ponto Úmido	
Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)
0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00
36,40	0,49	4,44	0,36	8,20	0,06
52,99	0,96	13,68	0,7	12,56	0,13
74,38	1,40	22,62	1,02	20,66	0,37
98,73	1,82	39,57	1,33	33,02	0,57
155,59	2,16	75,10	1,58	43,86	0,66
213,70	2,58	151,17	1,88	71,63	0,94
306,54	3,03	239,23	2,21	103,24	1,16
394,19	3,45	307,64	2,52	139,22	1,34
424,09	3,93	330,97	2,87	158,80	1,44
414,80	4,28	323,72	2,98	178,18	1,53
384,91	4,52	300,39	3,09	211,81	1,72
339,70	4,90	265,11	3,19	228,20	1,91
				227,46	1,98
				218,41	2,08

#### D. Classificação MCT

Golpes	w = 18,4 %		w = 22,49 %		w = 24,94 %		w = 30,57 %		w = 33,94 %		w = 35,09 %		w = 37,64%	
	$\Delta h$ (mm)	MEAS (g/cm <sup>3</sup> )												
2	16,04	0,89	22,16	0,83	28,02	0,84	23,62	0,99	6,13	1,19	0,93	1,24	8,20	1,15
3	15,74	0,93	21,03	0,90	26,94	0,92	12,55	1,15	1,60	1,28		1,24	1,72	1,27
4	15,78	0,97	21,95	0,94	23,66	0,98	6,75	1,26		1,30		1,25		1,30
6	14,83	1,03	20,35	1,01	20,18	1,08	0,67	1,41		1,31		1,25		1,30
8	14,50	1,07	20,01	1,07	17,43	1,17		1,41		1,31		1,26		1,31
12	13,89	1,12	17,91	1,16	10,27	1,31		1,41		1,31				1,31
16	11,78	1,18	14,65	1,26	8,28	1,37		1,42						
24	9,82	1,25	11,85	1,35	3,94	1,47		1,42						
32	9,13	1,30		1,45	1,26	1,55								
48		1,37		1,56		1,56								
64		1,41		1,62		1,58								
96		1,47		1,68		1,58								
128		1,51				1,59								

Molde	Altura sobresalente (mm)	Volumen sobresalente (cm <sup>3</sup> )	Massa cápsulas	Massa solo seco + capsula (g)	Massa seca sobresalente (g)	Massa solo seco/Massa seca sobresalente (%)
w = 18,4 %	10,37	20,327	10,39	50,86	30,65	132%
w = 22,49 %	10,41	20,768	9,92	52,84	34,92	123%
w = 24,94 %	10,89	21,008	10,63	10,63	33,42	0%
w = 30,57 %	10,11	19,464	10,99	42,83	27,69	115%
w = 33,94 %	10	19,871	9,58	44,71	26,11	135%
w = 35,09 %	10	19,871	9,92	46	25,00	144%
w = 37,64%	10	19,361	10,39	47,52	25,31	147%