

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

**ESTUDO DE SOLOS TROPICAIS UTILIZADOS EM CAMADA DE  
COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS UTILIZANDO A METODOLOGIA  
DE DANIEL E WU**

**MATHEUS MOREIRA PALMA**

ORIENTADOR: PROF<sup>a</sup>. CLÁUDIA MARCIA C. GURJÃO

COORIENTADOR: PROF. LUIS FERNANDO M. RIBEIRO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

BRASÍLIA-DF: JULHO/2017

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

**ESTUDO DE DOIS SOLOS TROPICAIS PARA UTILIZAÇÃO EM  
CAMADA DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS UTILIZANDO A  
METODOLOGIA DE DANIEL E WU**

**MATHEUS MOREIRA PALMA**

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 MÁRCIA COUTINHO GURJÃO, DSc. (UnB)  
(ORIENTADOR)

---

LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc. (UnB)  
(COORIENTADOR)

---

ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, DSc. (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)

---

EVANGELOS DIMITRIOS CHRISTAKOU, DSc (UnB)  
(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, 11 de Julho de 2017

## FICHA CATALOGRÁFICA

PALMA, MATHEUS MOREIRA

Estudo de solos tropicais utilizados em camada de cobertura de aterros sanitários utilizando a metodologia de Daniel e Wu.

[Distrito Federal, 2017]

ix, 32 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2017)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Solos tropicais
  2. Camada de cobertura
  3. Compactação
  4. Condutividade Hidráulica
- I. ENC/FT/UnB

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PALMA, M.M. (2017). Estudo de solos tropicais utilizados em camada de cobertura de aterros sanitários utilizando a metodologia de Daniel e Wu. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p53.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Matheus Moreira Palma

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Estudo de solos tropicais utilizados em camada de cobertura de aterros sanitários utilizando a metodologia de Daniel e Wu.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2017

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.

---

Matheus Moreira Palma  
Quadra 4 Conjunto B Casa 62 Sobradinho  
73025-042 – Sobradinho-DF – Brasil  
matheusmoreirapalma@gmail.com

## RESUMO

A geração de resíduos sempre foi uma característica inerente à sociedade moderna. Portanto, faz-se necessário um controle deste resíduo, a fim de que se diminua os impactos ambientais gerados por estes detritos. Um exemplo significativo para a conservação do meio ambiente é como esses materiais serão dispostos. Um dos melhores métodos encontrados para a colocação desse resíduo de forma segura e que seja positivo ecologicamente é o aterro sanitário. Com o novo Plano Nacional de Resíduos Sólidos, os lixões serão substituídos por aterros sanitários, no qual deve-se ter o preparo do solo adequado, a fim de que não haja contaminação do lençol freático pelo chorume gerado pelo resíduo. Portanto, este impedimento da penetração da água para dentro da estrutura de aterro é feito pela camada de cobertura, que será o foco deste trabalho. Com isso, esta camada deve ser constituída de solos compactados que possuam baixa permeabilidade e que sejam impermeáveis à água da chuva, para que esta não entre em contato com o resíduo que está abaixo da camada de cobertura. A metodologia que foi utilizada para fazer a análise de materiais não lateríticos em camada de cobertura foi proposta por Daniel e Wu, no qual estabelece parâmetros mínimos, tais como: resistência a compressão, contração volumétrica e condutividade hidráulica. Para a busca destes parâmetros, foram utilizados ensaios de caracterização, permeabilidade, compressão simples, contração volumétrica e compactação, sendo que este foi utilizada a metodologia MCT (Miniatura Compactação Tropical) que foi utilizado um solo laterítico, dando continuidade a uma outra pesquisa, em que se faz o mesmo estudo para um solo não laterítico. Além de ver a aplicabilidade do solo tropical na proposta de Daniel e Wu, foi utilizado o uso da classificação MCT para a caracterização correta do solo a ser estudado. Para este estudo, a metodologia MCT se mostrou de grande eficácia para a obtenção dos critérios estabelecidos por Daniel e Wu, já que essa classificação é baseada em propriedades mecânicas e hidráulicas de solos compactados. Portanto, para este solo estudado, todas as energias de compactação e suas respectivas umidades obtiveram êxito e os demais parâmetros tiveram resultados dentro e fora dos critérios determinados na metodologia e que variam com as energias utilizadas.

## SUMÁRIO

<b>1- INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 INTRODUÇÃO .....	1
1.2 OBJETIVO DO TRABALHO .....	2
1.2.1 OBJETIVO GERAL .....	2
1.2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO .....	2
<b>2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	3
2.1 CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	3
2.2 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	4
2.3 PANORAMA DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO .....	5
2.3.1 PANORAMA BRASILEIRO.....	5
2.3.2 PANORAMA DISTRITO FEDERAL.....	7
2.4 ESTRUTURAÇÃO DE UM ATERRO SANITÁRIO.....	9
2.4.1 CAMADA DE COBERTURA.....	10
2.5 SOLOS COMPACTADOS .....	12
2.5.1 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	14
2.5.2 RESSECAMENTO E FISSURAÇÃO .....	19
2.6 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS .....	20
2.6.1 CLASSIFICAÇÃO MCT .....	21
2.6.1.1 ENSAIO MINI-MCV .....	22
2.6.2 – ENSAIO MINI-PROCTOR .....	24
2.7 – SOLOS TROPICAIS.....	24
<b>3- METODOLOGIA</b> .....	26
3.1 – MATERIAL COLETADO.....	26
3.2 – CARACTERIZAÇÃO DO SOLO .....	27
3.2.1 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	26
3.2.2 – ENSAIOS CLASSIFICAÇÃO MCT EXPEDITA.....	27
3.3 – ENSAIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E HIDRÁULICAS .....	30
3.3.1- ENSAIO DE COMPACTAÇÃO UTILIZANDO MINI-PROCTOR.....	30
3.3.2- ENSAIO DE PERMEABILIDADE.....	30
3.3.3. - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES .....	31
3.3.4 – RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA .....	31
<b>4 – RESULTADOS</b> .....	33
4.1 - CARACTERIZAÇÃO .....	33
4.2 - CLASSIFICAÇÃO MCT.....	33
4.3 - COMPACTAÇÃO.....	35

4.4	- PROPRIEDADES MECÂNICAS E HIDRÁULICAS .....	35
4.4.1	-PERMEABILIDADE .....	36
4.4.2	-RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA .....	38
4.4.3	-RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES .....	41
5	- CONCLUSÕES.....	44
5.1	- RECOMENDAÇÕES GERAIS.....	44
5.2	- METODOLOGIA DE DANIEL & WU .....	44
5.3	- METODOLOGIA MCT .....	44
5.4	- SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	44

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Relação entre a geração de resíduo sólido urbano total e a per capita. (ABRELPE, 2014).....	5
Figura 2.2 - Coleta de Resíduo Sólido Urbano no Brasil em toneladas e quilogramas por habitante (ABRELPE,2014) .....	6
Figura 2.3 – Participação das regiões do país na coleta de RSU. (ABRELPE, 2014) .....	6
Figura 2.4 – Destinação final dos RSU coletados no Brasil (ABRELPE,2014) .....	7
Figura 2.5 – Destinação final de RSU no Distrito Federal (ABRELPE, 2014) .....	8
Figura 2.6 – Estrutura física de um aterro sanitário. (GODOI, 1997).....	10
Figura 2.7 - Componentes típicos de uma camada de cobertura (US.EPA, 2004).....	11
Figura 2.8 - Variação da Condutividade Hidráulica com o Teor de Umidade (DANIEL, 1984).....	13
Figura 2.9 – Variação da condutividade hidráulica para distintas energias de compactação (MITCHELL <i>et al.</i> , 1965) .....	17
Figura 2.10 – Procedimento para estabelecer zona de teor de umidade e massa específica seca que atendam ao critério de condutividade hidráulica (Daniel & Benson, 1990).....	18
Figura 2.11 – Zona aceitável baseada na condutividade hidráulica, contração volumétrica e resistência ao cisalhamento (DANIEL & WU, 1993) .....	19
Figura 3.1 -Campo experimental da Universida de Brasília .....	26
Figura 3.2 - Ábaco para a classificação MCT, proposta por Nogami e Villibor (1981) ... ..	29
Figura 3.3 – Montagem do ensaio de permeabilidade com permeâmetro de parede flexível (HEAD,1986) .....	30
Figura 4.1 – Curvas de deformabilidade para o ensaio mini-MCV .....	32
Figura 4.2 – Curvas de compactação do ensaio mini-MCV .....	33
Figura 4.3 – Carta de classificação MCT .....	34
Figura 4.4 – Curva de compactação para as energias reduzida, normal e modificada ....	35
Figura 4.5 – Ensaio de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede rígida com carga variável.....	36
Figura 4.5 – Ensaio de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede rígida com carga variável.....	36
Figura 4.6 –Variação do coeficiente de permeabilidade na energia reduzida .....	37
Figura 4.7 – Variação do coeficiente de permeabilidade na energia normal .....	37
Figura 4.8 – Variação do coeficiente de permeabilidade na energia modificada.....	38
Figura 4.9 – Variação volumétrica ao longo dos dias dos pontos de energia reduzida...39	
Figura 4.10 – Variação volumétrica ao longo dos dias dos pontos de energia normal ...39	

Figura 4.11 – Variação volumétrica ao longo dos dias dos pontos de energia modificada .....	40
Figura 4.12 – Gráfico tensão x deformação dos pontos da energia reduzida .....	41
Figura 4.13 – Gráfico tensão x deformação dos pontos da energia normal .....	41
Figura 4.14 – Gráfico tensão x deformação dos pontos da energia modificada.....	42
Figura 4.15 – Variação da resistência à compressão simples em função da energia de compactação .....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1– Tabela que registra a coleta e geração de RSU no Distrito Federal (ABRELPE, 2014).....	8
Tabela 2.2 - Características da energia normal, intermediária e de 30 golpes no Ensaio Mini-Proctor (DER/SP, 1988) .....	24
Tabela 4.1 -Umidade ótima e massa específica aparente seca de cada energia de compactação .....	34
Tabela 4.2 Valores obtidos de permeabilidade (k) .....	36
Tabela 4.3 -Valores obtidos da retração volumétrica para cada um dos pontos ensaiados .....	39
Tabela 4.4 -Valores obtidos de resistência à compressão simples .....	41
Tabela 5.1 -Resultado dos parâmetros obtidos nos resultados .....	44

## LISTA DE ABREVIATURA 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  
Na - Diferenças de altura pela leitura do extensômetro  
ASTM - *American Society for Testing and Materials*  
CETESB - Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental  
CH - Argila com alta Compressibilidade  
CL - Argila com Baixa Compressibilidade  
Ct - Contração  
c' - Coeficiente de deformabilidade da classificação MCT  
d' - Coeficiente 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 - Limite 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

Os - Massa do Solo Seco do Corpo de Prova

RSU - Resíduo Sólido Urbano

SC - Argila Arenosa

SUCS - Sistema Unificado de Classificação de Solos

t-Toneladas

# 1-INTRODUÇÃO

## 1.1 INTRODUÇÃO

O aumento do consumo de materiais industrializados vem gerando, proporcionalmente, um alto índice de resíduos sólidos. Como a reciclagem não é a mais eficaz possível e nem todo resíduo pode ser reciclado, esses detritos devem ser despostos em algum local adequado.

Portanto, no Brasil, em geral, não há uma adequação da destinação final adequada, visto a quantidade de lixões e aterros controlados encontrados no país. Estes tipos de disposições finais são altamente abusivos para o meio ambiente, isto é, podem gerar um grande problema ambiental. Por exemplo, no Distrito Federal, existia somente um local para a disposição final que é o aterro controlado do Jóquei, que não é a forma mais adequada para a disposição final de uma região.

Com isso, é necessário a construção e implantação de tratamentos adequados para este resíduo gerado pela população em geral. O aterro sanitário se destaca aos demais tipos de tratamentos, pois possui um baixo custo de implantação e operação, por ser uma tecnologia amplamente conhecida, e demanda menos tecnologia, se for comparada com plantas de incineração, que são locais onde se fazem a reciclagem térmica de resíduos (Santos, 2011).

A camada de cobertura, que será o foco deste trabalho, tem como objetivo o controle da entrada de água da superfície, que é a água da chuva predominantemente, para dentro do aterro. Este controle feito pela camada de cobertura impede a contaminação do solo de fundação e de águas subterrâneas, impedindo a poluição ambiental da região.

Para que ocorra uma impermeabilização correta, são utilizados materiais que possuem baixa permeabilidade, evitando a percolação da água do ambiente externo para a região onde estão os resíduos sólidos. Os materiais mais utilizados para a camada de cobertura são solo compactado, geocomposto argiloso, geomembranas ou a combinação desses materiais (COSTA, 2015).

Um dos principais parâmetros necessários para que se tenha uma impermeabilização eficaz é que o solo possua uma baixa condutividade hidráulica. Para isto, utiliza-se solos com alta plasticidade, que possuem características de retração e

inchamento. Entretanto, em tempo mais secos podem surgir fissuras, nas quais gerarão caminhos preferenciais para a percolação da água de superfície, ocasionando um aumento da permeabilidade do solo. Portanto, Daniel e Wu (1993) desenvolveram uma metodologia, que com o conhecimento da massa específica seca e o teor de umidade do solo compactado, determinam-se os parâmetros de condutividade hidráulica, resistência à compressão e contração volumétrica. Com esses fatores adequados, nota-se uma adequada condição de impermeabilização para camadas de cobertura de aterros sanitários.

## 1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral o estudo de solos tropicais para a utilização na camada de cobertura de aterros sanitários.

### 1.2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Utilizar a metodologia MCT, proposta por Nogami e Villibor, que consiste na classificação dos solos tropicais em não lateríticos e lateríticos;
- Comparar os resultados analisados em laboratório com alguns parâmetros propostos por Daniel e Wu (1993), nos quais são: condutividade hidráulica, resistência à compressão e contração volumétrica;
- Realizar ensaios em laboratório para a caracterização do solo, classificação MCT e propriedades mecânicas e hidráulicas deste solo.

## 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

De acordo com a norma NBR 10004/14 – Resíduos Sólidos - Classificação, resíduos sólidos são:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, 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.

Além da definição de resíduos sólidos, a norma 10004/14 faz-se a classificação dos tipos de resíduos sólidos, que são:

- a) Resíduos Classe I – Perigosos: São os resíduos que apresentam propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas que possam gerar risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices ou risco ao meio ambiente, quando o resíduo é manuseado de forma inadequada. E as características de resíduos de classe I são: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
- b) Resíduos Classe II – Não Perigosos: Esta classe é dividida em dois grupos: em resíduos classe II A - não inertes, e resíduos classe II B - inertes.
- c) Resíduos Classe II A- Não inertes: São aqueles que não se enquadram na classe I – Perigosos ou de resíduos classe II B – inertes. As propriedades destes resíduos são: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- d) Resíduos Classe II B- Inertes: São resíduos, quando amostrados em uma forma representativa e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada à temperatura ambiente, não tiveram nenhum de seus constituintes solubilizado a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, executando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

## 2.2 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei 12.305/2010, foi sancionada em 23/12/2010 por meio do Decreto 7.404. Esta lei tem como objetivo a redução ou a não geração de resíduos sólidos, o reaproveitamento e a disposição correta em caso de resíduos não recicláveis. Com a finalidade de minimizar os problemas ambientais, sociais e econômicos gerados pelo manejo inadequado destes resíduos.

Portanto, esta política prevê um compartilhamento de responsabilidades sobre o ciclo de vida dos produtos, envolvendo consumidores, fabricantes, distribuidores, comerciantes, cidadãos e titulares dos serviços públicos de limpeza urbana. Conseqüentemente, gerando uma melhor gestão destes resíduos criados pela população.

Esta lei elaborou um Plano Nacional de Resíduos Sólidos, no qual este plano diagnosticaria a situação atual dos resíduos sólidos e a proposição de soluções, baseadas em tendências internacionais, além de metas a serem cumpridas e programas, projetos e ações para o cumprimento dessas metas. Algumas metas deste Plano Nacional são:

- Redução, reutilização e reciclagem com o objetivo de reduzir a quantidade de resíduos destinados a disposição final;
- Aproveitamento energéticos dos gases gerados na disposição final dos resíduos sólidos;
- Eliminação e recuperação de lixões até 2 de Agosto de 2014
- Inclusão social e emancipação econômica de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis.

O prazo para a eliminação de lixões ou transformá-los em aterros sanitários foi transcorrido e com isso, uma das metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos não foi atingida. De acordo com a ABRELPE (2014), o percentual de resíduos sólidos destinados a aterros sanitários permaneceu de certa forma constante se comparar entre 2010, que foi de 57,6%, e 2014, que foi de 58,4%. Entretanto, os resíduos destinados para lugares inadequados, lixões por exemplo, aumentaram e chegaram a cerca de 30 milhões de toneladas por ano, em 2014.

## 2.3 PANORAMA DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO

O crescimento econômico e, conseqüentemente, uma mudança dos padrões de consumo de uma sociedade geram uma tendência no aumento da produção de resíduos sólidos por habitante (OECD, 2014). Já no Brasil, de acordo com Campos (2012), o aumento da renda da população da população mais pobre gera um aumento na produção de resíduos sólidos, contudo, caso ocorra uma diminuição deste crescimento de renda, a produção de resíduos muda proporcionalmente.

Com este aumento de produção de resíduo sólidos, a disposição final deste tem uma grande importância, já que ela pode gerar grandes problemas para a população local. Atualmente, as práticas mais rotineiras para o tratamento deste detrito são a reciclagem, compostagem, incineração ou aterros sanitários. Sendo o uso de aterro sanitários o mais praticado mundialmente. Entretanto, ainda em países não desenvolvidos, caso do Brasil, ainda ocorre lixões, onde não há um tratamento adequado destes resíduos.

### 2.3.1 PANORAMA BRASILEIRO

Com a nova política nacional de resíduos sólidos, iniciada em 2010, uma das metas do plano seria a redução da produção de resíduos sólidos para a disposição final. De acordo com a Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2014), em 2014, a geração de resíduos sólidos foi cerca de 78,6 milhões de toneladas, representando um aumento de 2,9% em relação ao ano anterior. Este aumento foi maior que a taxa de crescimento populacional do Brasil, que foi de 0,9%. Ou seja, a produção de resíduos sólidos está sendo maior que a taxa de crescimento populacional, que conseqüentemente está gerando um aumento de resíduos sólidos por habitante. Isto pode ser identificado na Figura 2.1.

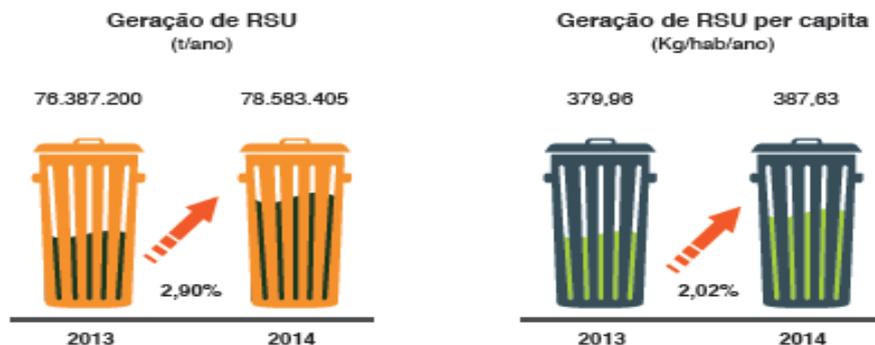


Figura 2.1 - Relação entre geração de resíduo sólido urbano total e per capita (ABRELPE,2014)

Já em relação a coleta de resíduos sólidos urbanos no Brasil houve uma certa melhoria, no qual aproximadamente 71,2 toneladas de resíduos foram coletadas, acarretando um aumento de 3,2% se comparado à 2013 (ABRELPE, 2014). Estes dados podem ser vistos adequadamente na Figura 2.2.

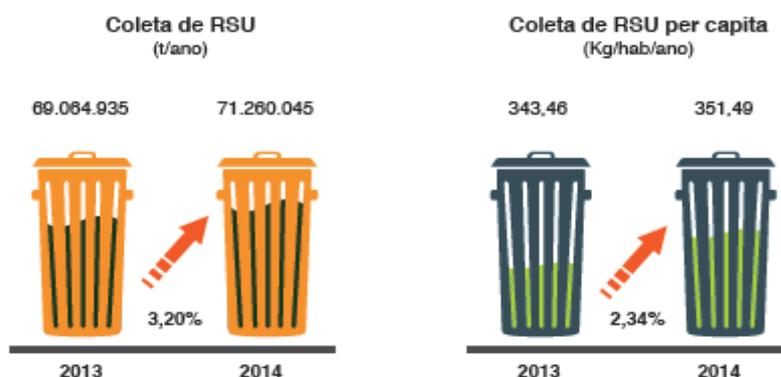


Figura 2.2 - Coleta de Resíduo Sólido Urbano no Brasil em toneladas e quilogramas por habitante (ABRELPE, 2014).

Com todas essas informações coletadas, a ABRELPE (2014) concluiu que cerca de 90,6% dos RSU, que são os que foram coletados pelas empresas de limpeza urbana, foram destinados a locais adequados de disposição final. Contudo, cerca de 7 milhões não foram coletadas adequadamente, isto é, estes resíduos foram dispostos em locais indevidos, sem nenhum tratamento prévio. Com isto, fez-se um mapa com a porcentagem com a contribuição de cada estado do Brasil para a coleta de resíduos sólidos. Sendo, naturalmente, as regiões sudeste e nordeste, respectivamente, com mais produção de resíduos sólidos no país. Isto pode ser visto na Figura 2.3.



Figura 2.3 – Participação das regiões do país na coleta de RSU (ABRELPE, 2014).

A disposição de RSU nos anos de 2013 e 2014, se manteve estável, cerca de 58,4% teve disposição final adequada, ou seja, foram destinadas a aterros sanitários ou outras formas de tratamentos menos utilizadas, como por exemplo a incineração. Conclui-se então que cerca de 30 toneladas de resíduos foram destinadas para lixões, cuja proteção para o meio ambiente e saúde pública são mínimas (ABRELPE, 2014). Estes dados podem ser melhor ilustrados na Figura 2.4.

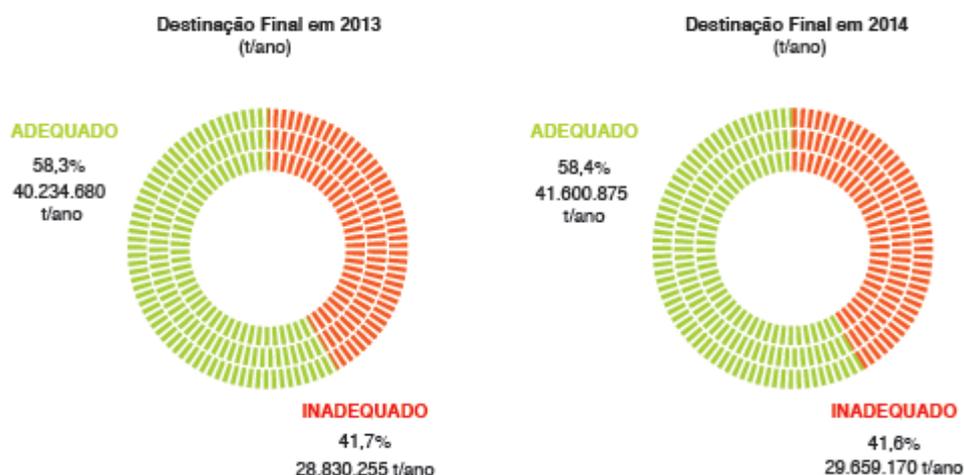


Figura 2.4 – Destinação final dos RSU coletados no Brasil (ABRELPE, 2014).

Portanto, pode-se notar que o Brasil tem de muito a evoluir em relação ao gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, principalmente na disposição final deste resíduo, já que não houve uma evolução significativa nos anos analisados.

### 2.3.2 PANORAMA DISTRITO FEDERAL

No Distrito Federal, a grande maioria dos resíduos gerados pela população são destinados ao aterro controlado do Jóquei, ou popularmente mais conhecido, o Lixão da Estrutural. Esta região de disposição final de resíduos sólidos, como o nome já diz, é um lixão, isto é, os resíduos são dispostos à céu aberto sem nenhum tratamento prévio.

O aterro controlado da Estrutural, é uma disposição de resíduos sólidos à céu aberto, não possui uma infraestrutura de tratamento para que o chorume gerado por esses resíduos seja impedido de penetrar a camada de solo e chegando, possivelmente, à um lençol freático. Isto é o que está ocorrendo com este lixão. O chorume gerado pelo lixo disposto nesta área infiltrou no solo e está começando a contaminar o lençol freático que, conseqüentemente, atingirá a bacia hidrográfica da região. Uma das possíveis bacias a serem afetadas é a do Paranoá, já que a região do lixão do jóquei se

encontra entre duas bacias que desaguam no Paranoá.

Por isso a necessidade da criação do aterro sanitário, que já foi construído na região de Samambaia. Com este aterro em funcionamento, o aterro controlado da Estrutural tende a ser desativado, diminuindo as futuras consequências ambientais. Como pode ser visto na Figura 2.5, todo o resíduo sólido gerado no Distrito Federal é destinado para aterro controlado, que, em vias de fato, é a mesma forma de um lixão, não há um controle ou um tratamento deste resíduo de forma adequada. Portanto, há uma grande necessidade de uma criação de um aterro sanitário para que ocorra uma disposição final destes detritos de forma adequada.



Figura 2.5 – Destinação final de RSU no Distrito Federal (ABRELPE, 2014)

De acordo com a ABRELPE (2014), o resíduo sólido urbano coletado no Distrito Federal é de 4,522 toneladas por dia e, por conseguinte, 1,551 quilogramas por habitante são gerados diariamente nesta unidade da federação. Comparando-se com 2013, houve um aumento da população do DF de 2,24% e um aumento da produção de RSU em 2,23%. Entretanto, o resíduo sólido per capita se manteve constante entre 2013 e 2014. Esses dados podem ser comprovados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Tabela que registra a coleta e geração de RSU no Distrito Federal (ABRELPE, 2014).

População Total		RSU Coletado				RSU Gerado	
2013	2014	(kg/hab/dia)		(t/dia)		2013	2014
2013	2014	2013	2014	2013	2014	2013	2014
2.789.761	2.852.372	1,551	1,551	4.326	4.423	4.423	4.522

## 2.4 ESTRUTURAÇÃO DE UM ATERRO SANITÁRIO

De acordo com a NBR 8419:1992 – Apresentação de projetos de aterro sanitários de resíduos sólidos urbanos, aterro sanitário tem a seguinte definição:

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.

O aterro sanitário, como qualquer solução de disposição final de resíduos, possui vantagens e desvantagens. As principais vantagens do aterro sanitário são: a forma correta da disposição do RSU, baixo custo relativo, grande capacidade de locação de resíduos e condições especiais para decomposição da matéria orgânica. Em contrapartida, as desvantagens são: indisponibilidade de grandes áreas próximas aos centros urbanos, dificuldade de obter material para o recobrimento diário, condições climáticas de operação para o ano todo e escassez de recursos financeiros e humanos para operar e gerenciar o aterro (Lima, 1995).

Os principais elementos estruturais de um aterro sanitário são: sistemas de drenagem para águas superficiais, gás e líquido percolado; sistemas de tratamento do líquido percolado e do gás; sistema de revestimento do fundo impermeável; sistema de cobertura; instrumentação e controle, desde a instalação até o fechamento do aterro. Estes elementos podem ser melhor vistos na Figura 2.6.

Costa (2015) enfatiza que um desempenho eficaz de um aterro sanitário consiste no recobrimento do conjunto de células de resíduos por uma camada de solo para que se evite a proliferação de vetores. Além disso, uma grande eficiência do aterro sanitário está relacionada aos sistemas de impermeabilização de fundo das células e dos sistemas de coberturas, intermediárias ou final. As camadas de cobertura, que serão o foco deste trabalho, controlam a entrada de água e oxigênio para dentro do aterro; minimizar a migração de gases para fora do aterro; servir como elemento de redução de odores e vetores de doenças e facilitar a recomposição da paisagem.

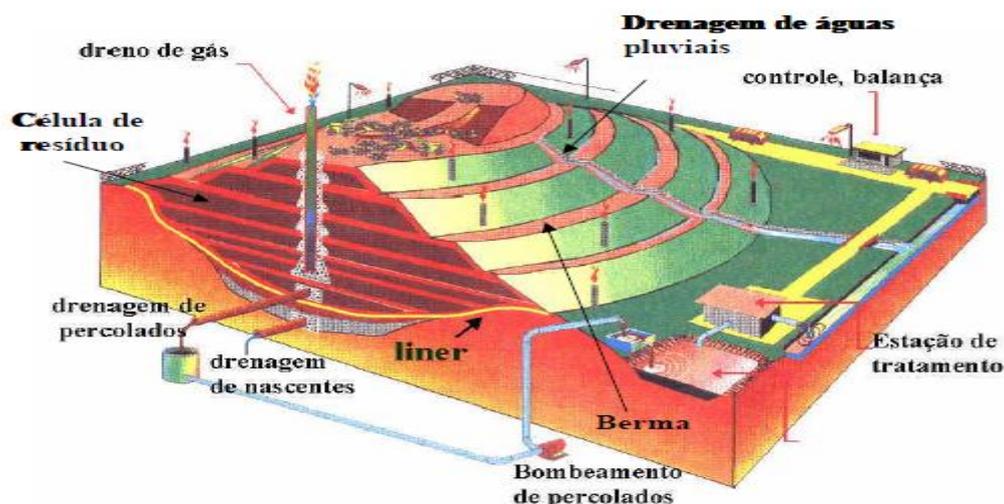


Figura 2.6 – Estrutura física de um aterro sanitário (Godoi, 1997).

#### 2.4.1 CAMADA DE COBERTURA

O objetivo da camada de cobertura consiste no impedimento físico entre a área externa do aterro sanitário e a área com as células de resíduos, para que não ocorra uma interação entre a água gerada externamente, por exemplo água da chuva, e os resíduos no interior do aterro sanitário e a saída de gases que os resíduos geram com a decomposição.

A cobertura final do aterro sanitário pode variar de acordo com as propriedades geotécnicas do material utilizado e as condições climáticas, na qual ela foi inserida (Catapreta, 2008). No caso deste trabalho, a camada de cobertura que será analisada conterá solos não lateríticos como material da camada de cobertura.

Os solos argilosos, no qual os solos não lateríticos estão inclusos, possui boa propriedade para a camada de cobertura. Pois, esta camada necessita de uma baixa condutividade hidráulica e baixa susceptibilidade à formação de trincas e fissuras, que são características intrínsecas aos solos argilosos (Piedade Jr, 2003).

Por conseguinte, CETESB (1993) denota que o tipo de solo mais indicado para impermeabilização é o solo argiloso, no qual algumas características devem ser atendidas, tais como:

- Classificação do solo como CL, CH, SC, ou OH, pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

- Mínimo de 30 % das partículas com diâmetros inferiores a 0,075 mm, isto é, no mínimo 30% das partículas devem passar pela peneira 200.
- Coeficiente de permeabilidade inferior a  $1 \times 10^{-9}$  m/s .
- LL maior ou igual a 30%
- IP mínimo de 15%
- pH mínimo de 7%

De acordo com o guia técnico da US.EPA (2004), os componentes que podem estar presentes na camada de cobertura de um aterro sanitário são: camada superficial para fins de vegetação, camada biótica ou de proteção, camada drenante, camada impermeabilizante ou barreira hidráulica, camada de controle de gás, camadas filtrantes e camada de fundação. Esses componentes podem ser vistos na Figura 2.7.



Figura 2.7 - Componentes típicos de uma camada de cobertura (US.EPA, 2004).

a) Camada Superficial: Esta camada tem como objetivo a prevenção da erosão causada pelo vento e pela água. Isso é auxiliado com o crescimento de vegetação na região.

b) Camada de Proteção ou Biótica: Tem como função proteger as camadas subjacentes de processos erosivos e da exposição dos ciclos de umedecimento e secagem.

c) Camada Drenante: Camada responsável por pela remoção da água que penetra

para o interior da camada de cobertura.

d)Camada Impermeabilizante: Tem como objetivo principal minimizar a percolação da água no sistema de cobertura do aterro, impedindo a infiltração e promovendo o armazenamento ou drenagem lateral da água vinda das áreas superiores.

e)Camada de Controle de gases: Direciona os gases gerados pelos resíduos para o dreno de gás.

f)Camada de Fundação: Serve para proporcionar um subleito firme para que ocorra uma compactação correta das camadas superiores. Além disso, promove a redução de recalque diferencial sofrido pelo aterro.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, com a norma NBR 8419 – Apresentação de projetos de aterros sanitários (ABNT, 1992) não especifica nenhum detalhamento físico para a cobertura do aterro sanitário para resíduos sólidos urbanos. A norma sugere que deve ser indicada a espessura da camada de cobertura do aterro e os locais de empréstimos dos materiais que serão utilizados para a sistema de cobertura.

A camada de cobertura é um componente físico do aterro no qual influenciará o desempenho do aterro sanitário como um todo. Portanto, as características de baixa permeabilidade devem ser garantidas durante a execução. Entretanto, durante a construção, nem sempre as condições previstas são de fato seguidas em frete. Com isso, a disponibilidade de materiais ideais nem sempre é possível no local de empréstimo que será utilizado, além do solo possuir maior fissuração do que o previsto, ocasionando uma região de preferência para a percolação da água externa na camada de cobertura. Conseqüentemente, os parâmetros devem ser bem calculados e analisados e conhecer bem os materiais que serão utilizados na construção.

## 2.5 SOLOS COMPACTADOS

A compactação do solo da camada de cobertura é importante, pois está relacionada à baixa condutividade hidráulica, ou seja, a baixa permeabilidade do solo, que é de necessária importância para o sistema de cobertura de um aterro sanitário.

De acordo com Lambe (1958), os solos argilosos apresentam dois tipos de estruturas diferentes, a floclada e a dispersa. Ambas características são influenciadas pelo teor de umidade, já que este fator proporciona a expansão ou contração da dupla camada difusa que é comandada pelo argilomineral.

Mitchell *et al.* (1965) mostra que a condutividade hidráulica é influenciada pelo teor de umidade e energia de compactação. Esta influência é inversamente proporcional, isto é, se o teor de umidade está além da umidade ótima ou a energia de compactação aumenta, a condutividade hidráulica diminui.

Esses fatores destacados por Mitchell *et al* (1965) variam a estrutura do solo em macro e micro escala. Na macro escala, o aumento do teor de umidade e da energia de compactação ocasiona um aumento no colapso das partículas e eliminam os poros interpartículas. Já na micro escala, o aumento desses fatores, teor de umidade e energia de compactação, reorienta as partículas de forma que há uma redução dos poros entre as partículas. O aumento da energia de compactação causa uma redução na frequência de poros, portanto causando uma diminuição na condutividade hidráulica (Acar & Olivieri, 1989).

A Figura 2.8 mostra um resultado clássico da variação da condutividade hidráulica com o teor de umidade e energia de compactação. De acordo com a curva apresentada, a condutividade hidráulica diminui com o aumento do teor de umidade e da energia de compactação.

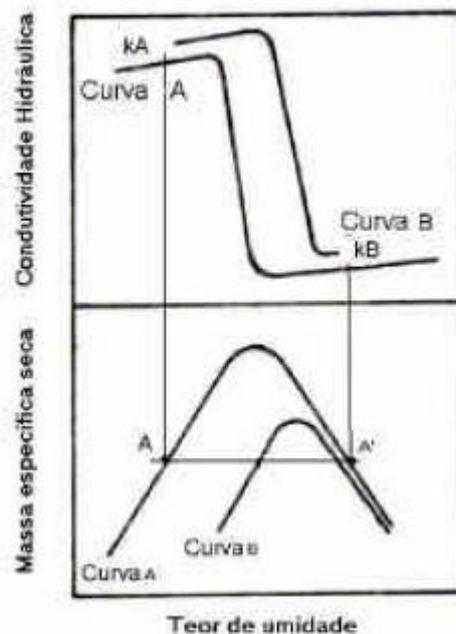


Figura 2.8 – Variação da Condutividade Hidráulica com o Teor de Umidade (DANIEL, 1984).

### 2.5.1 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Assim como foi visto anteriormente neste trabalho, a condutividade hidráulica é um parâmetro que deve ser estudado para a construção de um aterro sanitário, já que este fator garantirá a correta impermeabilização da camada de cobertura de um aterro.

Para encontrar o parâmetro condutividade hidráulica, aplica-se uma diferença de carga hidráulica em uma amostra saturada de solo, que por consequência, ocorrerá um fluxo de água dentro do solo ensaiado. A condutividade hidráulica foi definida por Lambe & Whitman (1969) como a taxa de um fluido pode fluir através dos vazios que estão dentro do solo analisado.

Com este ensaio de condutividade hidráulica, encontra-se um fator denominado coeficiente de permeabilidade ( $k$ ), no qual é a velocidade de escoamento média de um fluxo de água em um solo sob a ação de um gradiente hidráulico unitário. Portanto, a necessidade de fazer um estudo da condutividade hidráulica para camadas que atuarão como impermeabilizantes, já que se deve utilizar materiais com baixos índices de condutividade hidráulica.

Para solos compactados, a condutividade hidráulica pode variar por causa de alguns fatores, tais como:

- Distribuição do tamanho das partículas;
- Textura e forma da partícula;
- Composição Mineralógica;
- Índice de vazios;
- Grau de saturação;
- Estrutura do solo;
- Característica do fluido percolante;
- Tipo de fluxo;
- Temperatura;
- Teor de umidade na moldagem;
- Método e energia de compactação;

- Gradiente Hidráulico.

O tamanho das partículas e dos vazios entre elas alteram a condutividade hidráulica do solo. Ou seja, quanto menos vazios entre as partículas de solo, mais resistente será o solo à condutividade hidráulica. Então solos, com partículas menores, e conseqüentemente, com menos vazios são solos com baixa condutividade hidráulica.

Outro fator que influencia o valor da condutividade hidráulica é a textura e forma das partículas. Se as partículas são mais ásperas, o atrito gerado por elas será maior em relação a partículas lisas, portanto gerando uma resistência à condutividade hidráulica. Em relação à forma, partículas alongadas ou irregulares formam caminhos para a água mais tortuosos, mais problemáticos para a percolação da água, se forem comparados com partículas mais uniformes ou esféricas.

A composição mineralógica influencia na condutividade hidráulica em relação ao limite de liquidez e o índice de plasticidade do solo. Isto é, quanto maior esses fatores, menor a condutividade hidráulica. Os argilominerais presentes no solo apresentam a característica de expansão dos solos e, por conseguinte, a permeabilidade deste. Portanto, partículas mais ativas e com menor grau de agregação entre elas terão um menor coeficiente de permeabilidade. Isto é, partículas que apresentam alto grau de expansão, terão uma retenção da água maior.

O modo como o solo é preparado para o ensaio denota uma influência no tamanho e na quantidade vazios entre as partículas que se terão na amostra de solo analisada. Este volume de vazio, que é expresso em relação ao índice de vazios e porosidade, influenciam na condutividade hidráulica, já que um maior volume de vazios acarreta uma maior região para a percolação do fluido.

A eliminação do ar contido nas amostras de solo, que serão sujeitas ao ensaio de permeabilidade, é necessária, pois esse ar pode causar o impedimento da passagem de água por aquele espaço. Ou seja, as bolhas de ar que estão contidas pela tensão superficial da água permanecem, tornando um obstáculo para o fluxo de água. Portanto, o coeficiente de permeabilidade de um solo não saturado, onde não se retirou todo o ar do solo, é menor caso ele estivesse saturado (Pinto, 2000).

A estrutura do solo é o outro fator importante para a condutividade hidráulica do solo. A compactação, consistência e se o solo está compactado ou em seu estado natural apresentam influência no coeficiente de permeabilidade. Por exemplo, solos

compactados possuem uma condutividade hidráulica menor que no seu estado natural.

O coeficiente de permeabilidade depende da massa específica e da viscosidade do líquido que percola na amostra de solo. Além disso, este líquido pode ter feitos químicos e físicos que podem atingir as partículas de solo. Portanto, as alterações da permeabilidade que este líquido gera pode influenciar forças entre as partículas de solo que controlam comportamentos de floculação, dispersão, contração e expansão. Portanto, caso o líquido reage com as partículas ocasionando uma redução das forças de atração entre as partículas de solo, pode gerar um aumento da permeabilidade em questão.

Os tipos de fluxo estão relacionados, principalmente, com a velocidade cujo líquido está tendo dentro da amostra. Caso a velocidade esteja relativamente baixa, ela está no regime laminar que é facilmente calculada pela Lei de Darcy. Entretanto, caso a velocidade esteja maior que a velocidade crítica, já é o regime turbulento. Neste regime a lei de Darcy não é mais válida, nos quais os parâmetros da condutividade hidráulica são calculados.

A temperatura influencia a condutividade hidráulica a partir da viscosidade do fluido percolado. Portanto, um aumento de temperatura acarreta uma redução da viscosidade da água, isto é, a água torna-se mais fluida, que afetará a condutividade hidráulica medida. Para isto nos ensaios, fixa-se a temperatura em 20°C para que não ocorra influencia deste fator.

A energia de compactação é outro fator que influencia a condutividade hidráulica dos solos. De acordo com estudos de Mitchell *et al* (1965), os ensaios foram realizados após a saturação dos corpos de provas. Notou-se que para energias de menor dimensão as características foram similares. Os pontos mais secos pouco variaram e após a umidade ótima a diminuição da condutividade hidráulica foi notada. Para altos índices de energia de compactação, ocorreu variação da condutividade hidráulica desde os pontos mais secos. Com este aumento da energia, acarretou uma diminuição da condutividade hidráulica em cerca de cem vezes, principalmente nos pontos próximos a úmida ótima, como pode se ver na Figura 2.9.

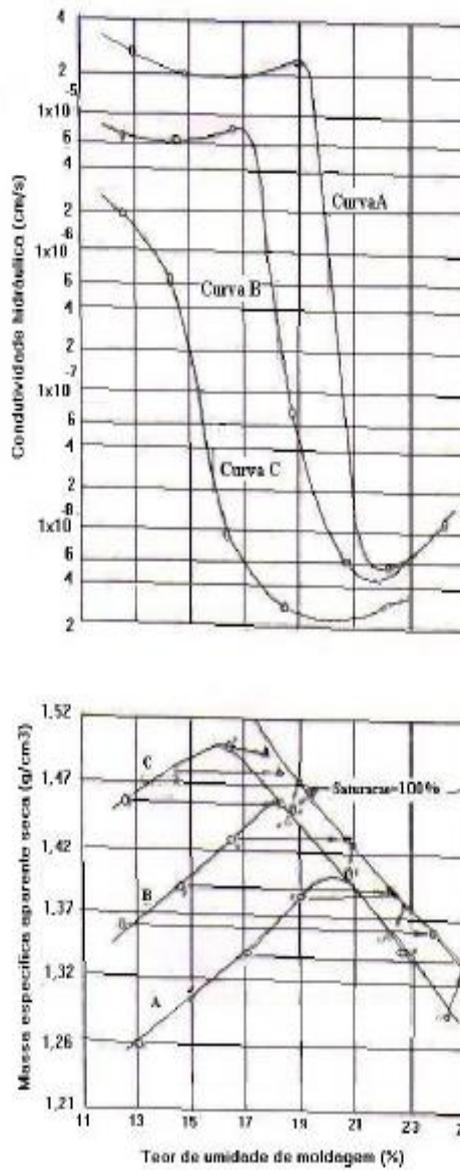


Figura 2.9 – Variação da condutividade hidráulica para distintas energias de compactação (Mitchell *et al.*, 1965).

A condutividade hidráulica em solos compactados varia diretamente em função da umidade de compactação, massa específica, seca e energia de deformação. Portanto, Daniel e Benson (1990) elaboraram uma metodologia para definir critérios de aceitação de solos para camadas de cobertura. Esta metodologia consiste em determinar uma zona admissível na curva de compactação dos solos, nos quais a massa específica seca e teor de umidade proporcionem condições ideais para utilizar este solo como uma barreira impermeável.

Esta metodologia recomenda alguns procedimentos, tais como:

1. Compactar cinco a seis corpos de prova de solo para cada energia de compactação utilizando Proctor modificado, normal e reduzido ilustrando várias curvas de compactação. (Figura 2.10.a);

2. Determinar a condutividade hidráulica dos corpos de prova nas condições do ensaio de compactação. Medir, também, o grau de saturação e a tensão confinante. As medidas de permeabilidade devem ser plotadas em função do teor de umidade da amostra. (Figura 2.10.b);

3. Plotar no gráfico massa específica x umidade de moldagem, os pontos que possuem valores de condutividade hidráulica admissíveis (inferior a  $m/s$ ) devem ser representadas com simbologia diferente aos demais (superiores  $am/s$ ). Identificar a zona de aceitação considerando o critério de condutividade hidráulica. (Figura 2.10.c);

4. Identificar novas zonas admissíveis em função de outros parâmetros, tais como: resistência ao cisalhamento, considerações de umedecimento e secagem, aparecimento de fissuras, interesses construtivos e práticas locais.

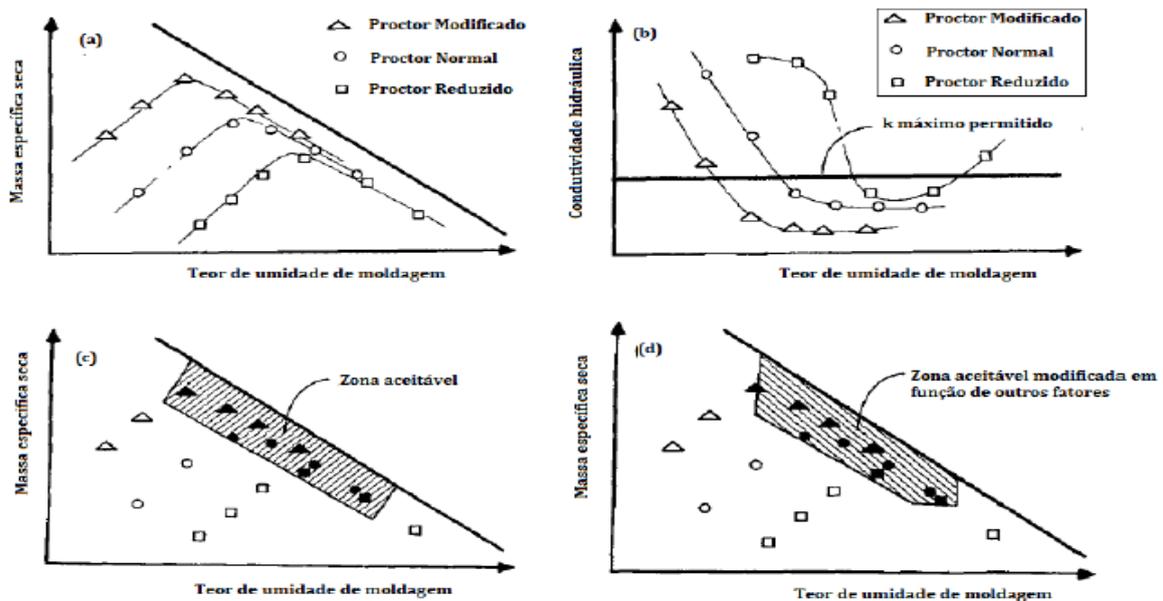


Figura 2.10 – Procedimento para estabelecer zona de teor de umidade e massa específica seca que atendam ao critério de condutividade hidráulica (Daniel & Benson, 1990).

Daniel e Wu (1993) aplicaram a metodologia proposta por Daniel e Benson (1990) considerando como critérios de aceitação: condutividade hidráulica inferior a  $1 \times 10^{-9} \text{m/s}$ , retração volumétrica máxima de 4% e resistência à compressão não confinada superior a 200 kPa. Cada um destes critérios foi avaliado, analisando as zonas aceitáveis para casa um deles. Essas zonas aceitáveis podem ser vistas na Figura 2.11, na qual se refere à condutividade hidráulica, contração volumétrica e resistência ao cisalhamento.



Figura 2.11 – Zona aceitável baseada na condutividade hidráulica, contração volumétrica e resistência ao cisalhamento (DANIEL & WU, 1993).

### 2.5.2 RESSECAMENTO E FISSURAÇÃO

A formação de fissuras por ressecamento da superfície do solo pela perda de umidade deve ser estudada, pois com essa criação de trincas, geram-se caminhos preferenciais para a percolação da água. Esse fenômeno pode ser influenciado por vários fatores, tais como: composição mineralógica, quantidade de argila, variação de sucção, umidade relativa do ar e temperatura, espessura da camada, condições de contorno e entre outros (Tang *et al.*, 2011).

De acordo com Lakshmikata (2009), em um solo com sinais de ressecamento, o surgimento de fissuras ocorre quando as forças de tensão excedem a resistência à tração do solo. Esta resistência é influenciada pelo teor de umidade do solo e da sucção. Com o início da fissuração, a propagação de fissuras será regida pelo estado de tensões existente no interior do solo. Isto é, a propagação dessas trincas é regida pela mecânica da fratura, tornando-se uma situação com a necessidade de uma estrutura numérica e teórica para este problema.

Lakshmikata (2009) apresenta uma classificação de fissuras, a partir de estudos

de Fang (1997), quanto ao surgimento destas. Esses tipos de fissuras são quanto à: retração, variações térmicas, esforços de tração e fraturamento.

As fissuras de retração são as mais comuns e são causadas pela variação volumétrica de retração na superfície ocasionadas pela evaporação da água. Consequentemente gera-se um alívio de tensões que provocam a fissuração do solo.

Em relação à variação térmica, o fissuramento ocorre quando o solo sofre uma variação brusca de temperatura.

Outros tipos de fissuramento, por esforços de tração, são gerados por carregamentos externos como estruturais, chuva, gelo, vegetação e carregamentos sazonais. Podem, também, ser associados às variações de umidade e tensões térmicas e carregamentos que provocam fraturas.

As fissuras provocadas por fraturamento são causadas pelas variações diárias de umidade, temperatura ou variação sazonal do lençol freático, chuva ou derretimento de neve que preencham as fissuras e os vazios do solo ocasionando um acréscimo da poro-pressão da água. Essa variação da poro-pressão acarreta um aumento das tensões internas e uma elevação das forças de compressão no interior da estrutura do solo. Portanto, as combinações das tensões de retração, térmicas e variação da poro-pressão resultam em fissuras provocadas por fraturamento.

## 2.6 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Existem várias classificações diferentes para os solos de acordo com a área de estudo em que se faz essa análise dos solos. Em engenharia civil, é utilizada mais amplamente a classificação geotécnica, no qual, busca-se associar as propriedades físicas dos solos com as modificações que as construções geram nestes solos. Portanto, existem duas classificações que são tradicionais no âmbito geotécnico que são: a Highway Research Board (HRB), que é mais utilizada em rodovias, e Unified Soil Classification System (SUCS), sendo ambas possuindo os limites de Atterberg (limites de liquidez e plasticidade) e granulometria. De acordo com Pessoa (2004), alguns órgãos rodoviários no Brasil vêm adotando a metodologia MCT para solos finos, no qual o enfoque desta classificação consiste na avaliação do comportamento dos solos.

No Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), os solos são divididos em 14 grupos e são representados por duas letras: a primeira relativa a granulometria e a

segunda a plasticidade. Portanto, solos que mais da metade da fração fina ficam retidos na peneira de 0,075 mm são denominados pedregulhos (G) e areais (S), podendo ser bem graduado (W) ou mal graduado (P). Para os solos que a fração fina passa mais da metade na peneira de 0,075 mm são chamados de siltes (M) e argilas (C), podendo ser de alta (H) ou baixa (L) plasticidade. Também, existem os solos orgânicos (Pt). Esta classificação se caracteriza em considerações tátil visual e textura.

A classificação HRB une as características granulométricas e as propriedades de plasticidade. É bastante adotada nos órgãos públicos rodoviários do país. Além dos limites de Atterberg e a granulometria, esta classificação adiciona um índice de grupo (IG), que é em função das porcentagens de material que passam pela peneira 0,075 mm. O índice IG atribui uma classificação dos solos de 0 a 20, sendo que estes valores variam inversamente proporcional com a capacidade do de suporte do subleito, considerando boas condições e compactação. Nesta classificação, os solos são divididos em grupos que variam de A1 a A7.

### 2.6.1 CLASSIFICAÇÃO MCT

Para os solos tropicais, essas classificações tradicionais geram resultados insatisfatórios, já que elas foram formuladas para solos dos Estados Unidos e Europa, portanto esses ensaios não seriam adequados para a separação dos principais tipos de solos encontrados nas regiões de clima tropical (Godoy *et.al.*, 2002).

Com o intuito de resolver este problema, Nogami & Villibor (1981) desenvolveram a metodologia dos ensaios MCT, abreviação de Miniatura, Compactado e Tropical. Portanto, esta metodologia caracteriza-se na determinação das propriedades que são mais influentes no comportamento solos tropicais, que são: contração, penetração e permeabilidade.

A classificação da metodologia MCT baseia-se em dois ensaios: o ensaio mini-MCV, que foi proposto por Nogami, que é adaptado ao ensaio MCV (Moisture Condition Value) proposto por Parsons (1976) e ensaio de perda de massa por imersão, proposto por Nogami & Villibor (1981).

A metodologia MCT classifica os solos tropicais em grandes duas classes: os lateríticos (L) e os não-lateríticos (N) e divididos em sete subgrupos: Não laterítico areias (NA), não lateríticos arenosos (NA`), não lateríticos siltosos (NS`), não lateríticos argilos (NG`), lateríticos areia (LA), lateríticos arenosos (LA`) e lateríticos argilosos

(LG').

O método expedito MCT avalia as seguintes propriedades: deformabilidade, resistência e permeabilidade. A deformabilidade é notada pela contração diametral por perda de umidade e pela expansão diametral por reabsorção de água. Já a resistência é avaliada com a penetração de um penetrômetro na pastilha de solo após esta ter sofrido reabsorção de água. E por fim, a permeabilidade é caracterizada pela ascensão capilar da água a partir do tempo e a capacidade de reabsorção de água após secagem prévia. Estas propriedades são importantes para as obras geotécnicas, já que a contração, penetração e permeabilidade são características importantes dos solos tropicais e estão relacionadas a deformabilidade, resistência e permeabilidade dos solos (Pessoa, 2004).

#### 2.6.1.1 ENSAIO MINI-MCV

O ensaio mini-MCV, elaborado pelo professor Nogami, é uma adaptação do ensaio MCV proposto por Parsons (1976), no qual os corpos de prova possuem as dimensões reduzidas e, desta forma, utiliza-se o equipamento de compactação e cilindro do ensaio mini-CBR.

A redução de dimensão dos corpos de prova gera uma diminuição da quantidade de solo usada na compactação, utiliza-se 200g de solo por teor de umidade, totalizando um total de 1000g, e, por conseguinte, um menor esforço utilizado na sua realização (emprega-se um soquete de 2270g). Apesar da redução da quantidade de solo empregada e um menor esforço utilizado para o ensaio, os outros procedimentos do ensaio mini-MCV são empregados da mesma forma que no ensaio original, permitindo uma obtenção de parâmetros da curva de calibração, teor de umidade versus mini-MCV, no qual é similar ao ensaio MCV proposto por Parsons & Beldon (1979) *apud* Gurjão (2005).

O ensaio mini-MCV permite a obtenção de uma família de curvas de compactação do solo que consiste em um gráfico do teor da umidade de compactação em relação à massa específica aparente seca. Estas curvas são calculadas a partir das alturas parciais atingidas pelos corpos de prova durante a aplicação da sequência de golpes pré-estabelecida. Com isso, as curvas possuiriam uma maior abrangência de energias (inferiores, intermediárias e superiores). Nogami e Villibor (1980) enfatizam que no ensaio mini-MCV, após a moldagem dos corpos de prova, podem ser realizados ensaios de medida de capacidade de suporte tipo mini-CBR e outros da mesma família,

para a condição sem imersão ou umidade de moldagem.

Para a classificação MCT, além dos ensaios mini-MCV, precisa-se do ensaio da perda de massa por imersão, proposto por Nogami e Villibor (1980). Este ensaio consiste na determinação do solo quando imerso em água e os corpos de provas utilizados são os mesmo do ensaio mini-MCV. O ensaio da perda de massa por imersão tem como objetivo avaliar a erodibilidade do solo analisado.

Portanto, com o resultado dos ensaios mini-MCV e da perda de massa por imersão, Nogami e Villibor (1980) fizeram um sistema de classificação de solos, classificação MCT, que possui dois grandes grupos distintos: os lateríticos (L) e os não-lateríticos (N) e subdividindo em sete grupos. Esta classificação tem como objetivo, quando estes solos estão compactados, prever suas propriedades mecânicas e hidráulicas, principalmente para obras viárias. (Pastore & Fontes, 1998 *apud* Gurjão, 2005). Os tipos de solos classificados pela classificação MCT e suas respectivas siglas seguem abaixo.

- NA – Não laterítico areia: Areias, siltes e misturas de areias e siltes, quartzosos e/ou sericíticos.
- NA' – Não laterítico arenoso: Areias quartzosas com finos passando na peneira 0,0075 mm.
- NS' – Não laterítico silteoso: Siltes arenosos.
- NG' – Não laterítico argiloso: Solos argilosos.
- LA – Laterítico areia: Areias com pouco finos.
- LA' – Laterítico arenoso. Solos arenosos.
- LG' – Laterítico argilo: Argilas a argilas arenosas.

A grande vantagem da classificação MCT é a facilidade de distinguir os solos entre lateríticos e não lateríticos, utilizando ensaios com execução relativamente simples. Com isso, as considerações geológicas, geoquímicas, pedológicas são eliminadas (Nogami, 1989). Entretanto, um revés da classificação MCT é a sua aplicabilidade somente na porção de solo que passa integralmente pela peneira de 2,0 mm (Gurjão, 2005).

## 2.6.2 – ENSAIO MINI-PROCTOR

O ensaio de compactação mini-proctor é realizado em amostras de solos com granulação fina menor que 2,0mm. São colocadas em moldes cilíndricos padronizados, em que a energia de compactação aplicada é referente ao número de golpes, altura de queda e massa do soquete, com corpos de provas de aproximadamente 50 mm. Na tabela abaixo são apresentadas as características da energia normal, intermediária e de 30 golpes normalmente utilizadas para o ensaio mini-Proctor.

Tabela 2.2 - Características da energia normal, intermediária e de 30 golpes no Ensaio Mini-Proctor (DER/SP,1988).

Características			
Energias	Normal	Intermediária	30 golpes
Massa do Soquete (M)	2270 g	4540 g	2270 g
Altura de Queda (N)	305 mm	305 mm	305 mm
Número de Golpes Totais (Nt)	10	12	30
Diâmetro do Molde Cilíndrico (Dcp)	50 mm	50 mm	50 mm
Volume do CP (Vcp)	97,82 cm <sup>3</sup>	97,82 cm <sup>3</sup>	97,82 cm <sup>3</sup>
Energia de Compactação (Ec)	7,79 kfg.cm/cm <sup>3</sup>	16,84 kfg.cm/cm <sup>3</sup>	23,38 kfg.cm/cm <sup>3</sup>

As energias normal, intermediária e modificada do método mini-Proctor são adotadas respectivamente com 5 golpes de soquete leve, 6 golpes de soquete pesado e 12 golpes do soquete pesado, que são aplicadas parada cada lado do corpo de prova (Nogami & Villibor, 1995).

## 2.7 – SOLOS TROPICAIS

Nogami e Villibor (1996) ressaltam que solos tropicais são solos que possuem comportamentos distintos dos solos que são analisados corretamente pelos procedimentos tradicionais de caracterização e/ou classificação geotécnica.

Portanto, há um grande interesse em uma metodologia específica para os solos tropicais, que são predominantes no Brasil, já que os métodos tradicionais de classificação produzem erros, tais como:

- Caso o solo classificado se comporte melhor que o previsto, haverá um superdimensionamento da estrutura em estudo;
- Se a classificação do solo for menor que a prevista, haverá um subdimensionamento, conseqüentemente gerando uma redução de vida do pavimento, que é o foco de estrutura da classificação MCT, ou uma ruptura precoce (Nogami & Villibor, 1996).

Com isso, considerando o manto de intemperismo, os solos tropicais compreendem genericamente os lateríticos (profundamente intemperizados) e os não lateríticos (pouco intemperizados) (Pessoa, 2004).

### 3- METODOLOGIA

Neste trabalho foram feitos ensaios em amostras de um solo laterítico, de acordo com a classificação MCT, para que se possa a analisar algumas características que sejam permitidas para a camada de cobertura de um aterro sanitário.

A caracterização dos solos foi feita pela classificação MCT, proposta por Nogami, e, conseqüentemente, se utilizarão os ensaios mini-MCV e de perda de massa por imersão, necessários para o uso da classificação MCT. Em relação aos parâmetros para a camada impermeabilizante de um aterro sanitário, foi utilizada a metodologia proposta por Daniel e Wu (1993), na qual foi realizado ensaios de compactação com mini-Proctor.

Portanto, neste projeto foi utilizada a classificação MCT e os ensaios necessários para essa classificação para caracterizar o tipo de solo tropical que foi estudado, confirmando o solo laterítico, e utilizado os parâmetros propostos por Daniel e Wu (1993) para o uso deste solo para uma camada impermeabilizante de um aterro sanitário.

Para a obtenção destes parâmetros propostos por Daniel e Wu (1993) foi realizado os ensaios de permeabilidade de carga variável em permeâmetros paredes rígida, ensaios de resistência à compressão simples e ensaios de retração volumétrica. Todos estes ensaios seguiram as normas da ASTM e ABNT.

#### 3.1 – MATERIAL COLETADO

O material que foi utilizado neste trabalho foi coletado no campo experimental próximo ao SG 12, na Universidade de Brasília. O local pode ser visualizado, com o auxílio do Google Maps, na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Campo experimental da Universidade de Brasília

## 3.2 – CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

### 3.2.1 – ENSAIOS CLASSIFICAÇÃO MCT EXPEDITA

Os ensaios básicos para a classificação MCT expedita utilizam anéis de PVC e um mini-penetrometro para determinar os parâmetros  $c'$  e a penetração. Os ensaios completos consistem na compactação mini-MCV, utiliza corpos de prova de 50 mm de diâmetro ou 26mm de diâmetro, que são denominados subminiaturas, e os ensaios de perda de massa por imersão, que são obtidos gráficos resultantes dos ensaios que encontram os parâmetros  $e'$  e  $c'$ , que, por conseguinte, localiza-se o solo ensaiado em uma carta classificatória. Estes ensaios são realizados de acordo com a norma DER-SP (1988).

Após estes ensaios, geram-se dois gráficos. O primeiro se refere à variação de altura do corpo de prova, devido ao logaritmo do número de golpes em relação à variação de energia, para cada teor de umidade. Com este gráfico encontra-se um coeficiente, denominado  $c'$ , a partir da inclinação da reta ajustável à curva relativa ao mini-MCV= 10. Caso a reta não coincidir com o mini-MCV = 10, deve ser feito uma interpolação gráfica para encontrar esta curva. Esta inclinação, por onde se encontra o fator  $c'$ , é obtida pela relação  $\Delta A_n/n$ , em escala logarítmica, onde  $\Delta A_n$  é definido pela variação de altura, para  $n$  e  $4n$  golpes, sendo  $n$  o número de golpes.

O outro parâmetro que devem ser encontrados pelos ensaios é o índice  $e'$ . Este índice representa o conjunto de expansão e coesão do solo  $e$ , além disso, a facilidade de ganho de massa específica com a compactação  $e$ , conseqüentemente, a graduação e tipo de mineralogia da fração de areia contida no solo,  $e$ , também, a quantidade de argila presente neste solo ( $d'$ ).

O coeficiente  $c'$ , utilizado em conjunto com os parâmetros classificatórios do solo, foi determinado a partir da inclinação da curva de deformabilidade, de acordo com a expressão abaixo:

$$c' = \frac{\Delta(A_n - A_{4n})}{10\Delta \log n} \quad (3.1)$$

Onde:  $\Delta (A_n - A_{4n})$  – Diferença de altura para  $n$  e  $4n$  golpes;

n – Número de golpes

O segundo gráfico contém uma família de curvas de compactação, devido à variação de energia, que correlaciona, em cada energia, a densidade aparente seca com o teor de umidade de compactação. Deste gráfico obtém-se outro parâmetro, denominado  $d'$ , cujo valor corresponde ao coeficiente angular da curva de 12 golpes, curva correspondente à energia normal de compactação, do ramo seco da curva de compactação.

Do ensaio de perda de massa por imersão, obtém-se o parâmetro  $P_i$ , a ser utilizado conjuntamente com os parâmetros  $c'$  e  $d'$  na classificação do solo. Sua determinação consiste em se deixar imersos em água, por no mínimo 24 horas, os corpos de prova resultantes do ensaio de compactação mini-MCV, na posição horizontal e com 1 cm fora do cilindro de compactação. O solo ao ser desprendido cai dentro de uma cápsula, determinando-se posteriormente, a massa seca contida nesta. O valor de  $P_i$  é determinado pela equação abaixo:

$$P_i = \frac{10.Pd.A}{P_s} \quad (3.2)$$

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

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

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

Determina-se o mini-MCV pela Equação 3.3:

$$mini-MCV = 10 \log B \quad (3.3)$$

Onde:  $B$  é o número de golpes obtido pela interseção das curvas com diversos teores de umidade e  $\Delta A_n = 2,0$  mm.

Com os resultados da perda de massa por imersão para cada teor de umidade (ou valor de mini-MCV), traça-se uma curva perda de massa versus mini-MCV, lançando-se as perdas de massa em ordenadas, e os valores de mini-MCV correspondentes, em abscissas. Dessa curva é extraído um parâmetro  $P_i$ ; que traduz a perda de massa característica do solo, e é utilizado para fins de classificação.

A perda de massa por imersão é determinada para o índice mini-MCV igual a 10 ou 15, conforme a altura do corpo de prova no final da compactação. Caso o corpo de prova, para mini-MCV igual a 10, apresente altura final inferior a 48 mm, indicando alta

massa específica, a perda de massa é determinada para o índice mini-MCV igual a 15; caso contrário determina-se à perda de massa correspondente ao índice mini-MCV igual a 10 (DER, 1988).

O coeficiente  $e'$  é calculado através da seguinte fórmula, onde:

$$e' = \sqrt[3]{\frac{Pi}{100} + \frac{20}{d'}} \quad (3.4)$$

$e'$  = coeficiente classificatório;

Pi = perda de massa por imersão, (%).

$d'$  = coeficiente angular da curva de compactação referente à energia de 12 golpes no ensaio de mini-MCV.

A classificação é feita por intermédio de uma carta de eixos cartesianos, em cujas abscissas encontram-se valores de  $c'$  e, na ordenada, os valores do índice  $e'$  mostrado na Figura 2.13.

Neste ábaco, para as abscissas é utilizado o índice  $c'$ , que representa a textura do solo e em ordenadas o índice  $e'$ , que caracteriza o “caráter” laterítico do solo. Nesse sistema os solos podem ser classificados como lateríticos e não lateríticos, com a nomenclatura NA (areia não laterítica), NA' (arenoso não laterítico), NS' (siltoso não laterítico), NG' (argiloso não laterítico), LA' (arenoso laterítico) e LG' (argiloso laterítico).

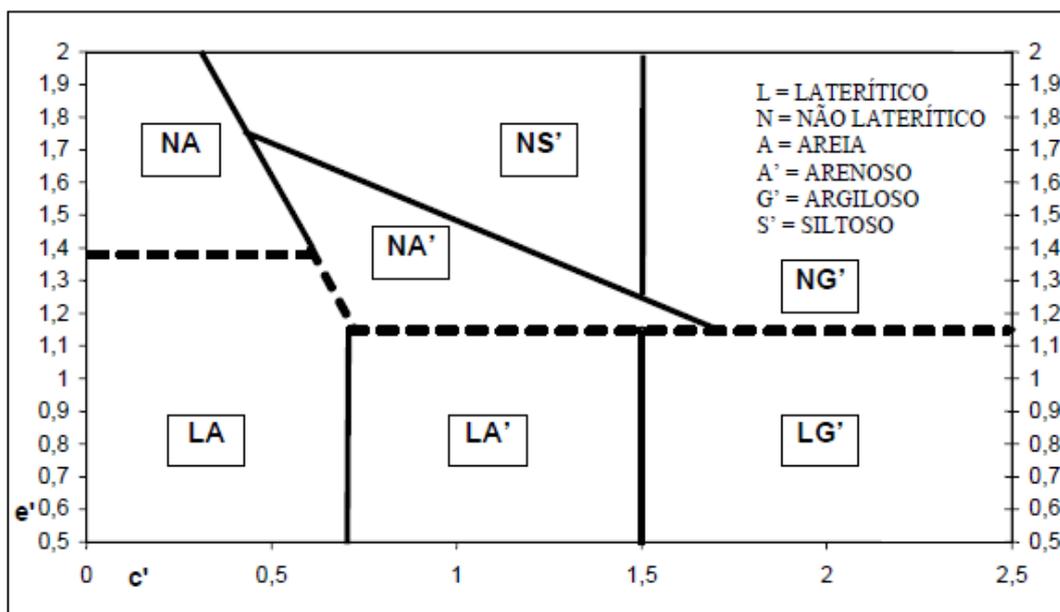


Figura 3.2 - Ábaco para a classificação MCT, proposta por Nogami e Villibor (1981).

### 3.3 – ENSAIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E HIDRÁULICAS

#### 3.3.1- ENSAIO DE COMPACTAÇÃO UTILIZANDO MINI-PROCTOR

Os ensaios de compactação foram feitos de acordo com a Norma ME228 do DNER (1994) que especifica o uso de equipamento de compactação em miniatura. Inicialmente, deixam-se as amostras secando ao ar livre e mede-se as respectivas umidades hidrosópicas e acrescenta-se ao fator teor de umidade, valores de cinco teores de umidade que serão avaliados no ensaio para determinação da compactação.

Logo após esses procedimentos inicial, pesa-se 200g de amostra de solo e insere-se no molde de compactação. Posteriormente, são efetuados golpes com o soquete e o número de golpes aplicados são condizentes com a energia de compactação que será utilizada. Por exemplo, para uma energia reduzida são efetuados 5 golpes com o soquete leve. Já para uma energia normal, utiliza-se de 6 golpes com o soquete pesado e, finalmente, 12 golpes para uma energia modificada. Após esses primeiros golpes, o corpo de prova é invertido e efetuado o mesmo número de golpes aplicados inicialmente.

A altura do corpo de prova posteriormente aos golpes é medida por um extensômetro que é colocado em uma haste do soquete. Caso esta altura não esteja dentro do intervalo estabelecido, deve-se calcular por proporção a quantidade de amostra de solo que ficará dentro do intervalo e, com isso, repetir a compactação.

Para cada corpo de prova executado a compactação, calcula-se a massa específica aparente do solo seco e os respectivos teores de umidade, que, conseqüentemente, constrói-se a curva de compactação.

#### 3.3.2- ENSAIO DE PERMEABILIDADE

O ensaio de permeabilidade foi feito de acordo com a norma NBR 14545 – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável (ABNT,2000). Com os dados obtidos pelo ensaio de compactação, umidade ótima e massa específica aparente, moldam-se corpos de provas nos mesmos moldes cilíndricos utilizados no ensaio de compactação. O objetivo deste ensaio é encontrar o coeficiente de permeabilidade para cada amostra.

Além do ensaio de permeabilidade com parede rígida, que foi o ensaio detalhado anteriormente, mostra-se interessante realizar o ensaio de permeabilidade com parede

flexível, cuja metodologia foi proposta por Daniel (1994). Segue abaixo a Figura 3.2, que mostra a montagem de um permeômetro com parede flexível.

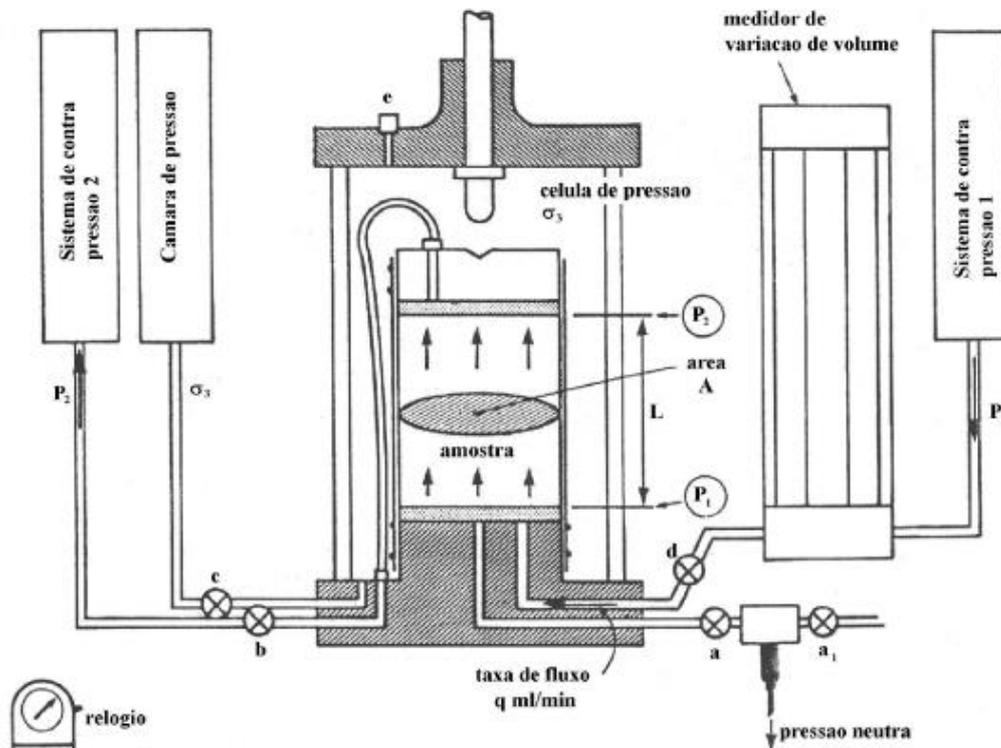


Figura 3.3 – Montagem do ensaio de permeabilidade com permeômetro de parede flexível (Head, 1986).

### 3.3.3. - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Este ensaio foi utilizado com três corpos de prova para cada amostra de solo. Estes corpos de prova são cilíndricos, com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, que são compactados na umidade ótima e com massa específica seca máxima. Os corpos de prova foram compactados a partir de cinco camadas de 2 cm em uma prensa hidráulica. Após a compactação foram verificadas a massa e as dimensões dos corpos de prova. (Costa, 2015).

### 3.3.4 – RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA

Este ensaio tem como objetivo medir o comportamento do solo quando exposto as condições ambientais do laboratório. Foram 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 para cada três dessas amostras, os parâmetros de umidade e massa específica aparente, que foi determinada no ensaio de compactação.

Logo após a moldagem, faz – se a compactação em uma prensa hidráulica em uma camada única de 2 cm. Os corpos de prova foram secados ao ar livre, sendo medidas diariamente as variações das dimensões e as respectivas massas das amostras, com o objetivo de obter uma curva da variação do volume em relação ao tempo e outra variação da massa em relação ao tempo, até que ocorra uma estabilização das massas e dos volumes.

## 4 – RESULTADOS

### 4.1 - CARACTERIZAÇÃO

#### 4.1.2- CLASSIFICAÇÃO MCT

A classificação que terá maior fator para qualificar este tipo de solo será a classificação MCT, já que é a melhor classificação para solos tropicais. Para se fazer a classificação correta do tipo de solo, é necessário fazer dois ensaios: o ensaio mini-MCV e o de perda de massa. Com os ensaios feitos, encontram-se dois fatores, 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. Portanto, nestes ensaios foram construídos 5 corpos de prova com as umidades de 8,41%, 12,41%, 16,32%, 20,84% e 24,22%.

No ensaio Mini-MCV, foram feitas curvas de deformabilidade, que, consequentemente, foi obtido o valor do coeficiente  $c'$ . Este coeficiente é obtido através da inclinação da curva que tem o valor de mini-MCV 10 e que passa pela reta da diferença de altura de 2 mm. As curvas de deformabilidade podem ser visualizadas na Figura 4.1. O valor do coeficiente  $c'$  foi de 1,56.

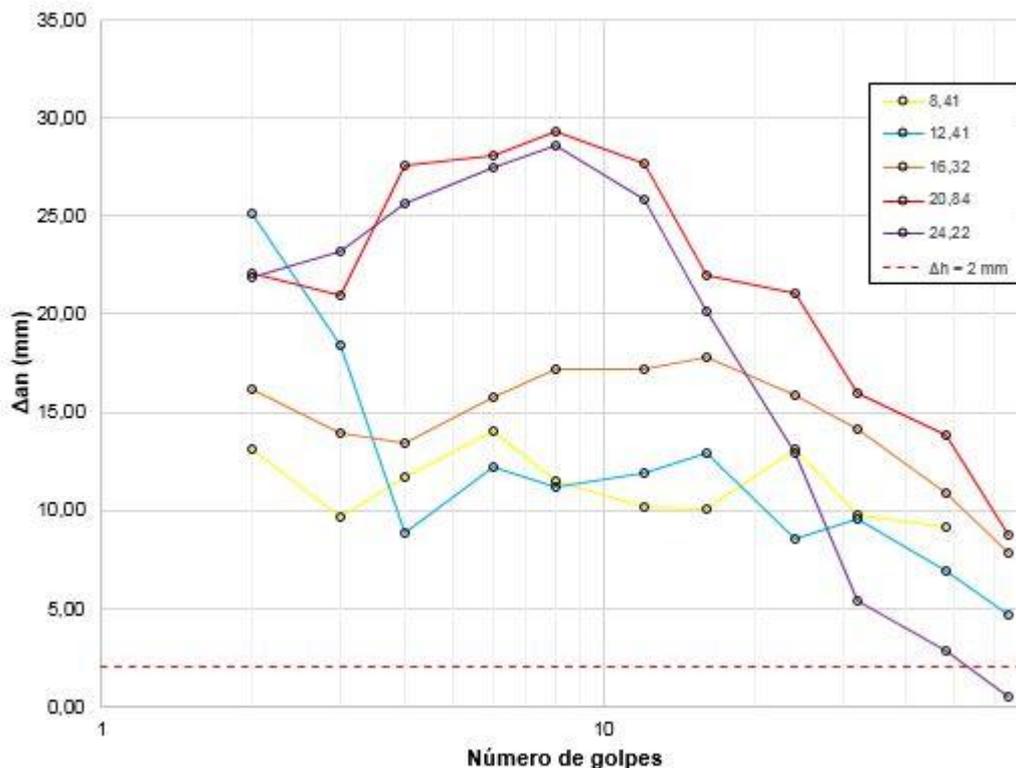


Figura 4.1 – Curvas de deformabilidade

Em seguida, encontrou-se um coeficiente  $d'$ , que é necessário para a obtenção do índice  $e'$ . Este parâmetro  $d'$  é encontrado no gráfico da massa específica aparente seca em relação a umidade, como pode ser observado na Figura 4.2. Portanto, o valor obtido para  $d'$  foi de 0,0062. Encontrado o valor de  $d'$ , é possível obter o valor do índice  $e'$ . Para este tipo de solo analisado, índice  $e'$  é de 0,95.

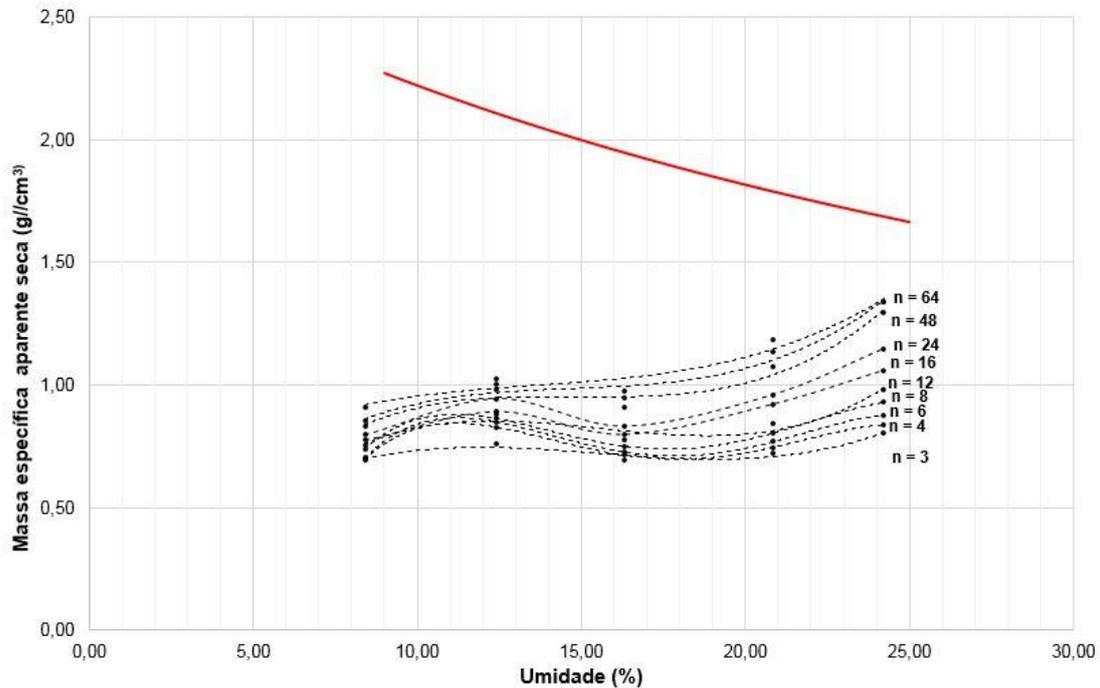


Figura 4.2– Curvas de compactação do ensaio de mini-MCV

Com os valores do coeficiente  $c'$  e o índice  $e'$ , pode-se obter a classificação MCT na carta proposta por Nogami & Villibor, apresentada da Figura 4.3. Conclui-se que o solo analisado é classificado é  $LG'$ , laterítico argiloso.

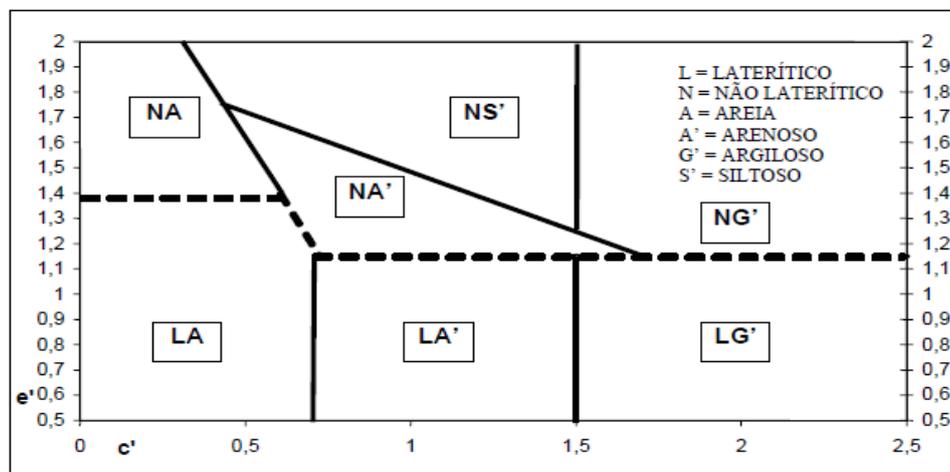


Figura 4.3 – Carta de classificação MCT

## 4.2 - COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação foi feito seguindo a metodologia mini-Proctor. Portanto, foram utilizadas três energias de compactação (reduzida, normal e modificada) e, com isso, foram determinados a umidade ótima e a massa específica seca aparente ( $\gamma_d$ ) para cada energia utilizada. Foram utilizadas 5 diferentes umidades, e conseqüentemente, gera-se uma curva de compactação para cada energia utilizada.

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 4.1 e na Figura 4.8.

Tabela 4.1 – Umidade ótima e massa específica aparente seca de cada energia de compactação

Energia	Umidade Ótima (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
Modificada	24,41	1,55
Normal	33,31	1,45
Reduzida	35,12	1,39

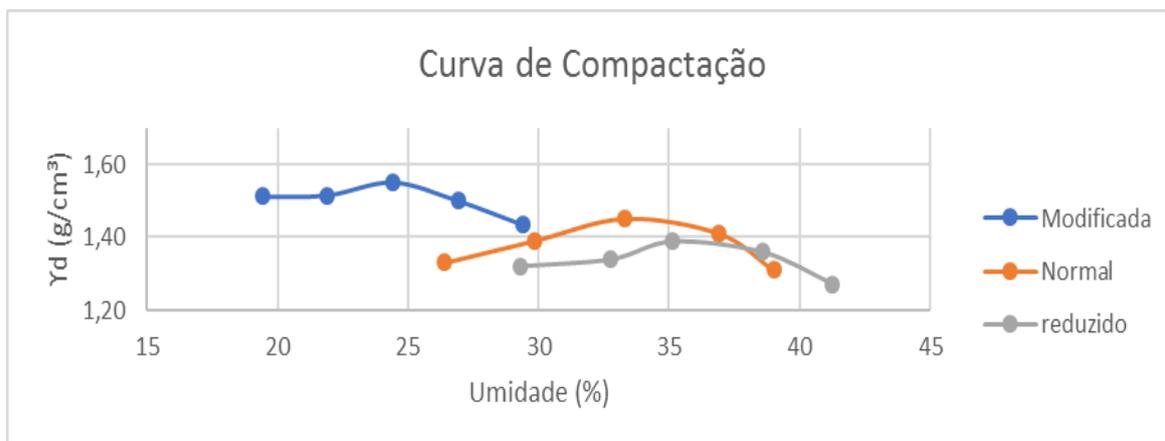


Figura 4.4 – Curva de compactação para as energias reduzida, normal e modificada

Como se pode notar na curva de compactação, à medida que há um aumento das energias de compactação, há um acréscimo da massa específica aparente das amostras e uma umidade ótima maior.

## 4.3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS E HIDRÁULICAS

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

Nestes ensaios foi utilizado solo compactado para três energias de compactação diferentes. Portanto, para cada energia utilizada empregou-se corpos de provas para a umidade ótima, para um ramo seco e para um ramo úmido.

#### 4.3.1-PERMEABILIDADE

O ensaio de permeabilidade foi feito de acordo com a NBR 14545 (ABNT, 2000). A figura 4.5 apresenta o ensaio sendo realizado.



Figura 4.5 – Ensaio de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede rígida com carga variável

Durante os ensaios, notou-se que quanto maior for a energia de compactação nos corpos de prova, menor a condutividade hidráulica ( $k$ ) da amostra. Além do mais, para a mesma energia de compactação, quanto maior o teor de umidade do solo, menor a condutividade hidráulica ( $k$ ) das amostras. Estes dados podem ser vistos na Tabela 4,2 e nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9.

Tabela 4.2 – Valores obtidos de permeabilidade (k)

Energia Reduzida		Energia Normal		Energia Modificada	
Umidade (%)	k (m/s)	Umidade (%)	k (m/s)	Umidade (%)	k (m/s)
32,78	$6,3 \times 10^{-8}$	29,86	$3,25 \times 10^{-9}$	19,41	$8,67 \times 10^{-9}$
35,12	$5,74 \times 10^{-8}$	33,31	$2,96 \times 10^{-9}$	24,41	$8,11 \times 10^{-9}$
38,57	$5,89 \times 10^{-8}$	36,91	$3,13 \times 10^{-9}$	29,41	$8,24 \times 10^{-9}$

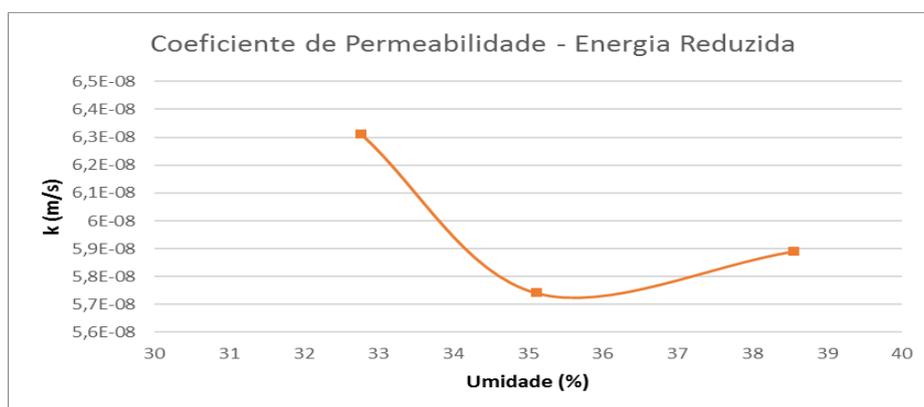


Figura 4.6 – Variação do coeficiente de permeabilidade na energia reduzida

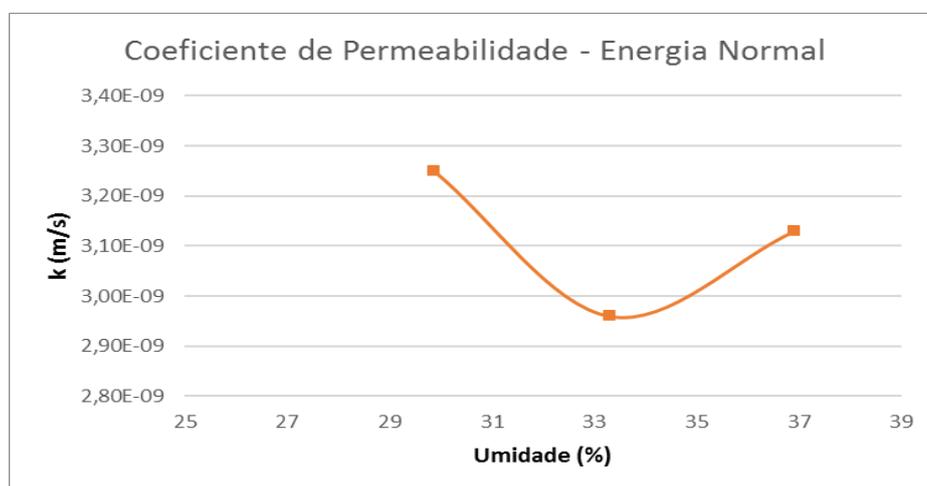


Figura 4.7 – Variação do coeficiente de permeabilidade na energia normal

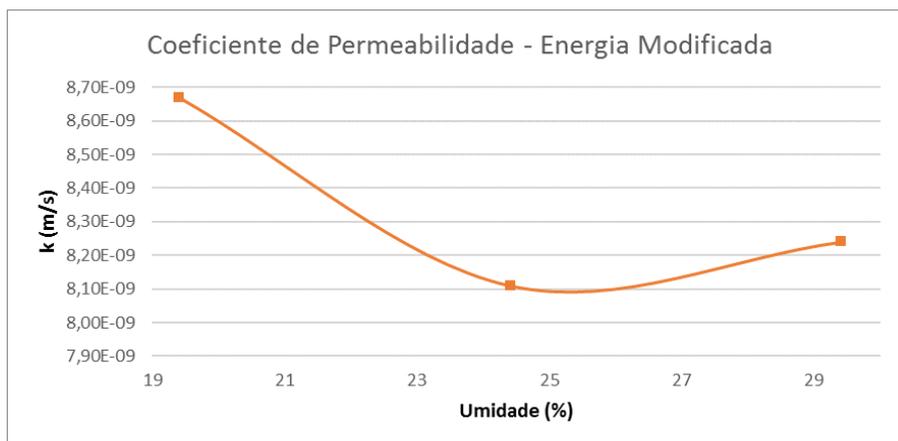


Figura 4.8 – Variação do coeficiente de permeabilidade na energia modificada

O coeficiente de permeabilidade é maior para os teores com menor umidade. Já para a umidade ótima, o coeficiente de permeabilidade é menor que a das umidades com teores menores ou maiores de umidade. Entretanto, a variação do coeficiente de permeabilidade do com menor teor de umidade para a umidade ótima é maior do que a variação da umidade ótima para o teor com maior umidade (Daniel, 1984). Esta variação pode ser verificada nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9, onde a variação do ramo seco para a umidade ótima foi consideravelmente maior do que a variação da umidade ótima para o ramo úmido.

De acordo com Nogami & Villibor (1995), os solos lateríticos compactados possuem um alto grau de variação da permeabilidade ao longo da curva de compactação, visto que a elevada resistência dos agregados argilosos naturais encontrados nesse tipo de solo ocasionam essa elevada variação.

#### 4.4.2-RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA

O ensaio de retração volumétrica mede a variação volumétrica do solo compactado quando exposto a temperatura ambiente. Portanto, foram feitas amostras moldadas em discos de 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura para cada energia de compactação e para as umidades do ramo seco, umidade ótima e ramo úmido. Estes valores podem ser vistos na Tabela 4.3.

Foram realizadas medições durante sete dias, pois foi quando a variação se tornou estável. A variação e os valores coletados durante estes sete dias podem ser observados nas Figuras 4.9, 4.10, 4.11.

Tabela 4.3 – Valores obtidos de retração volumétrica para cada um dos pontos ensaiados

Energia Reduzida		Energia Normal		Energia Modificada	
w (%)	Retração (%)	w (%)	Retração (%)	w (%)	Retração (%)
32,78	-3,75	29,86	-4,3	19,41	-3,08
35,12	-4,33	33,31	-4,5	24,41	-3,4
38,57	-4,77	36,91	-4,67	29,41	-4,16

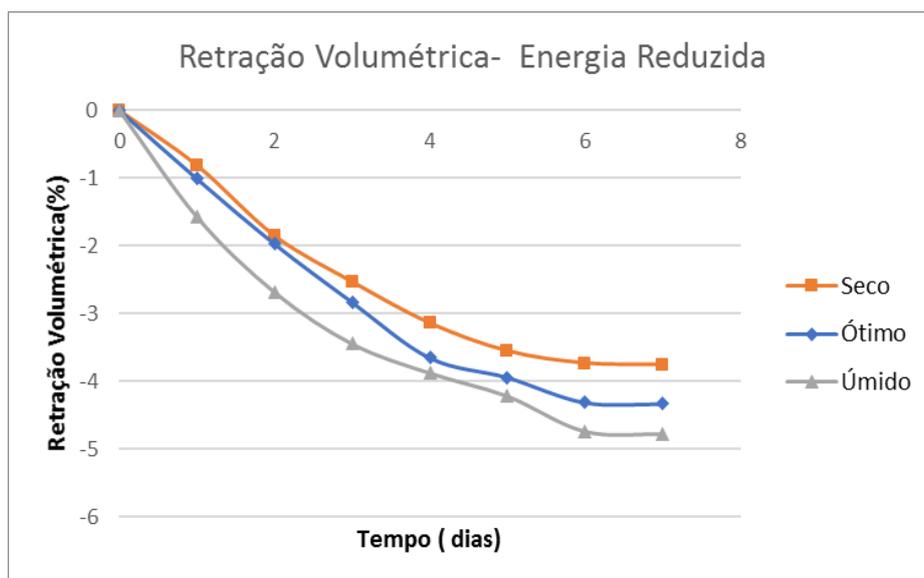


Figura 4.9 – Variação volumétrica ao longo dos dias dos pontos da energia reduzida

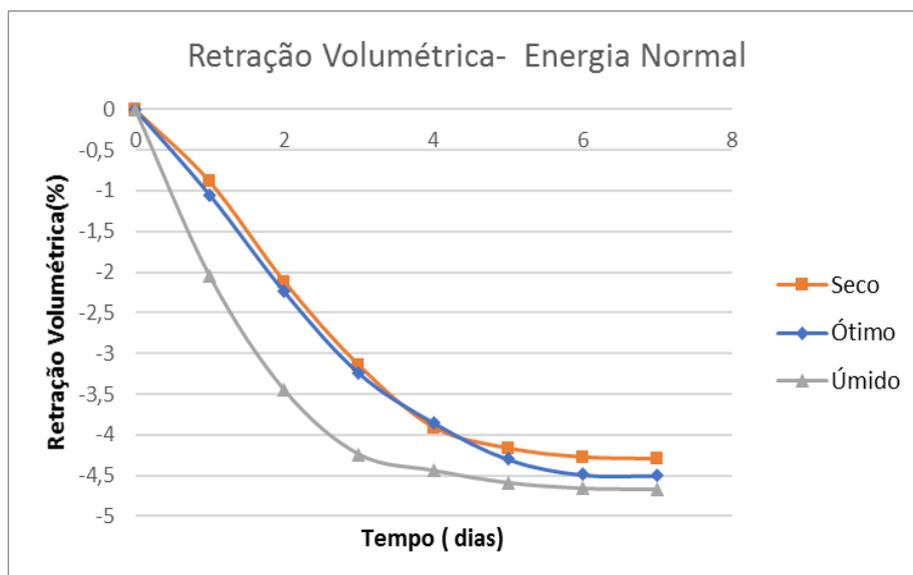


Figura 4.101 – Variação volumétrica ao longo dos dias dos pontos da energia normal

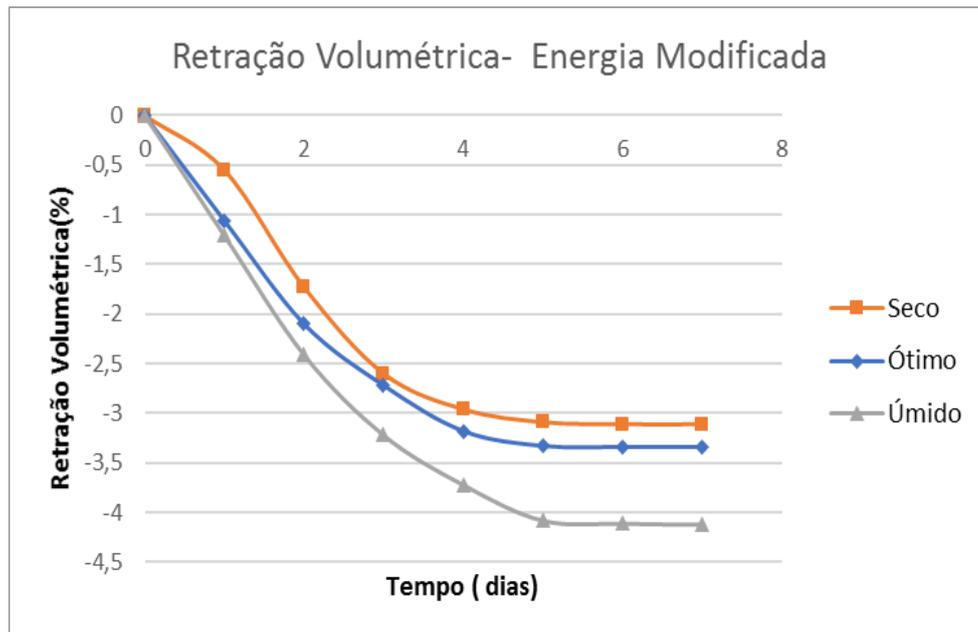


Figura 4.11 – Variação volumétrica ao longo dos dias dos pontos da energia modificada

Em todas as amostras analisadas, as maiores variações ocorrerão nos primeiros dias, sendo a maior no primeiro dia e, deste modo, diminuindo gradativamente até o final da análise. Comparando entre as energias de compactação, a maior variação volumétrica ocorreu na energia de compactação reduzida e foi diminuindo a variação para as demais energias de compactação, constatando que a energia de compactação modificada foi com a menor variação. Em relação às umidades, quanto maior o teor de umidade, maior a variação volumétrica da amostra, isto é, a do ramo úmido foi a que ocorreu a maior variação de volume entre os demais teores de umidade. Esta baixa expansibilidade encontrada neste ensaio é notória em solos lateríticos compactados, principalmente com alto teor de argila que confere essa contração tão evidente. (Nogami & Villibor, 1995)

Analisando os resultados obtidos no ensaio com os critérios estabelecidos por Daniel e Wu (1993), que diz que a máxima retração volumétrica do solo deve ser de 4%. Para este tipo de solo analisado, o ramo seco da energia de compactação reduzida e os ramos secos e da umidade ótima da energia de compactação modifica atenderam a este critério de 4%.

#### 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 4.4 e nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14.

Tabela 4.4 – Valores obtidos de resistência à compressão simples

Energia Reduzida		Energia Normal		Energia Modificada	
w (%)	RCS (kPa)	w (%)	RCS (kPa)	w (%)	RCS (kPa)
32,78	55,78	29,86	212,01	19,41	371,22
35,12	48,84	33,31	107,85	24,41	328,65
38,57	32,14	36,91	95,21	29,41	234,19

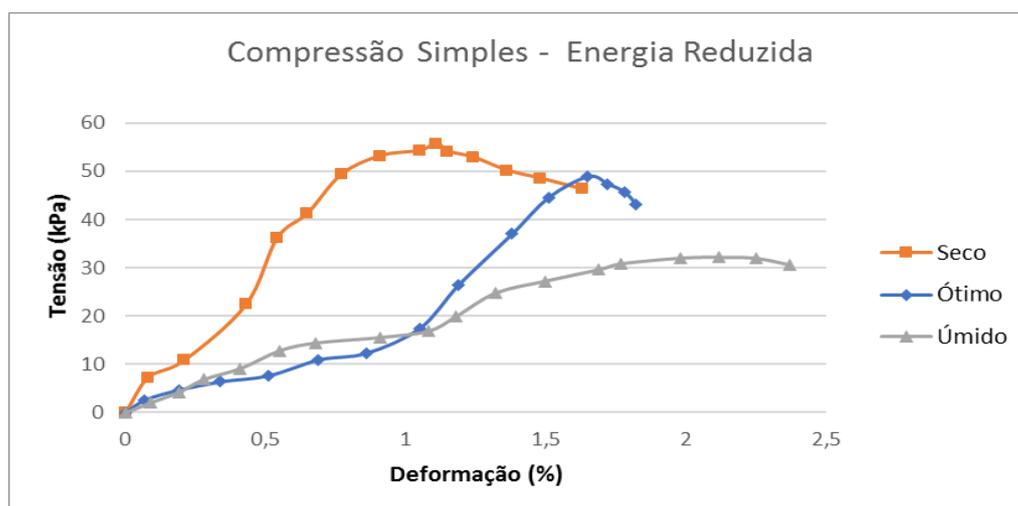


Figura 4.12 – Gráfico de tensão x deformação dos pontos da energia reduzida

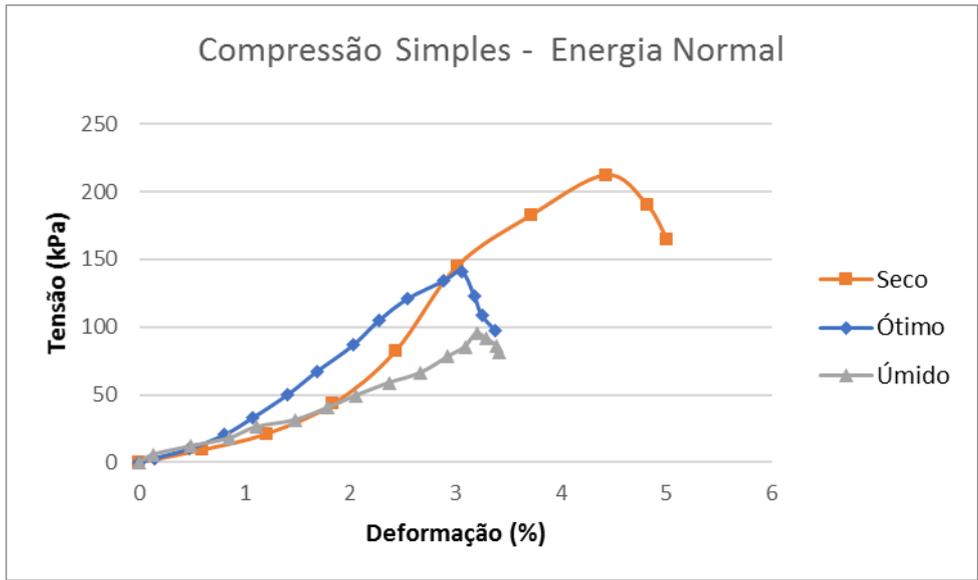


Figura 4.13 – Gráfico de tensão x deformação dos pontos da energia normal

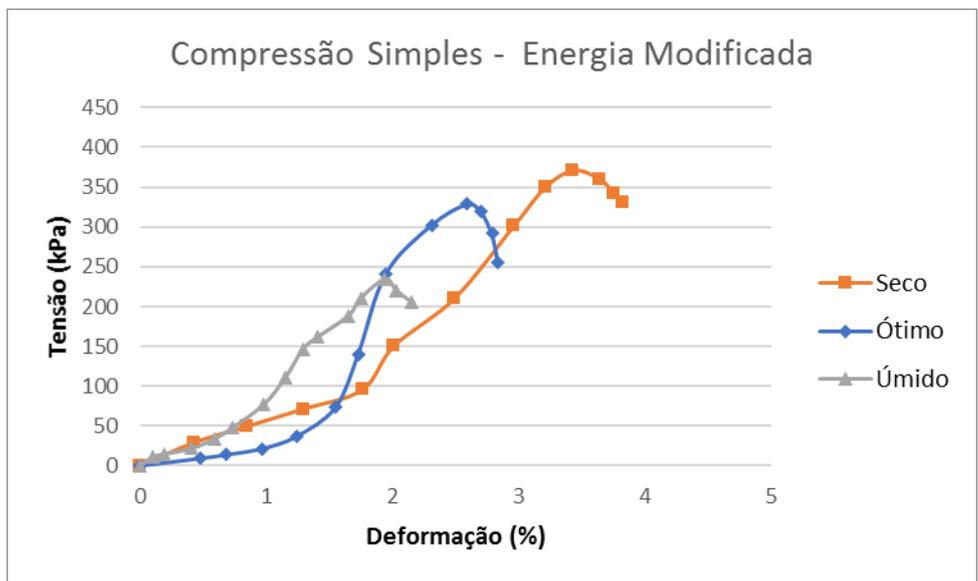


Figura 4.14 – Gráfico de tensão x deformação dos pontos da energia modificada

De acordo com a Figura 4.15, nota-se que com o aumento do teor de umidade, há uma diminuição na resistência à compressão simples. Não obstante, com a elevação da energia de compactação, há um aumento proporcional da tensão empregada na compressão simples.

No gráfico da energia normal, no teor de umidade ótimo, após ao ponto máximo de tensão, há uma queda brusca da tensão e esta diminuição abrupta não era esperada. Concluiu-se então que pode ter sido ocasionado por erro do procedimento do ensaio, pois pode se ter criado regiões com tensões mais fracas no corpo de prova.

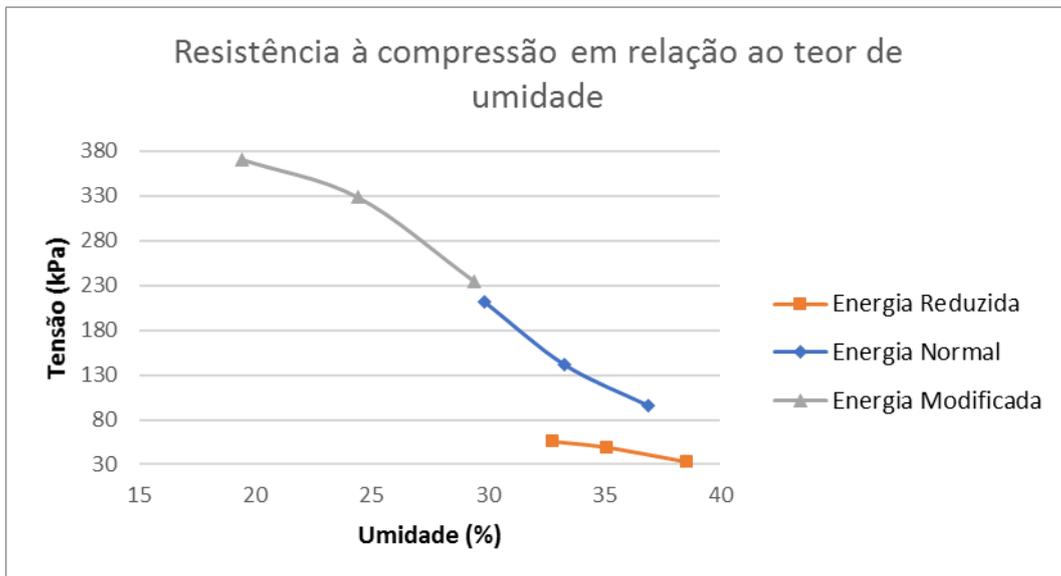


Figura 4.15 – Variação da resistência à compressão simples em função da energia de compactação

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.

## 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1- CONCLUSÕES GERAIS

As conclusões para as características do solo estudado para a aplicação de camada de cobertura para aterros sanitários podem ser divididas em duas partes: caracterização do solo pela metodologia MCT e estudo das propriedades mecânicas e hidráulicas do solo, fazendo a análise dos critérios estabelecidos pela metodologia de Daniel e Wu (1993).

### 5.2 – CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

O método utilizado para a caracterização do solo foi a metodologia MCT, proposta por Nogami & Villibor (1995). A classificação MCT para o solo estudado foi a de LG', que é laterítico e argiloso. Este tipo de solo é bem comum na região do Distrito Federal e no Brasil em geral, já que é um solo bastante intemperizado. Nogami & Villibor (1995), propuseram essa classificação para solos tropicais e, a princípio, para obras de pavimentação, que devem ter quase as mesmas características da camada de cobertura de aterro sanitário, isto é, baixa permeabilidade e baixa retração volumétrica.

Para este estudo, a metodologia MCT se mostrou de grande eficácia para a obtenção dos critérios estabelecidos por Daniel e Wu (1993), já que essa classificação é baseada em propriedades mecânicas e hidráulicas de solos compactados.

### 5.3- METODOLOGIA DE DANIEL E WU

A metodologia de Daniel e Wu (1993) para a camada de cobertura de aterros sanitários possui três parâmetros mecânicos e hidráulicos que devem ser atendidos para o solo compactado. Estes três critérios são:

- Permeabilidade menor que  $1 \times 10^{-9}$  m/s;
- Retração volumétrica menor do que 4%;
- Resistência à compressão simples superior a 200 kPa.

Os ensaios realizados anteriormente tinham como objetivo comparar os resultados destes com os critérios propostos por Daniel e Wu (1993).

- Para o critério permeabilidade, para os critérios de Daniel e Wu (1993), coeficiente de permeabilidade menor que  $1 \times 10^{-9}$  m/s, não foram obtidos valores menores que o mínimo em nenhuma energia de compactação. Entretanto, de acordo com a US.EPA (2004), valores entre  $1 \times 10^{-7}$  m/s e  $1 \times 10^{-9}$  m/s podem ser utilizados para aterros de resíduos sólidos. Portanto, para este solo estudado, todas as energias de compactação e suas respectivas umidades obtiveram êxito.
- Em relação a retração volumétrica, somente as energias de compactação reduzida no ramo seco e a modificada nos ramos seco e umidade ótima atenderam o critério de retração volumétrica, isso é, tendo a retração volumétrica menor que 4%.
- A resistência a compressão simples deve ser maior que 200 kPa. No solo estudado, pode ser encontrado esses valores para as energias de compactação normal, para o ramo seco, e para todas as umidades na energia de compactação modificada.

De acordo com a Tabela 5.1, pode se observar quais parâmetros obtiveram êxito para as características propostas por Daniel e Wu (1993).

Tabela 5.1 – Resultado dos parâmetros obtidos nos resultados

	Energia reduzida			Energia normal			Energia modificada		
	Ramo seco	Umidade ótima	Ramo úmido	Ramo seco	Umidade ótima	Ramo úmido	Ramo seco	Umidade ótima	Ramo úmido
<b>Permeabilidade</b>									
<b>Retração Volumétrica</b>									
<b>Resistência à Compressão Simples</b>									



Reprovado no critério



Aprovado no critério

Deve se frisar que, os parâmetros propostos por Daniel e Wu (1993), foram categorizados para solos de clima temperado, que possui várias características diferentes do solo tropical. Portanto, é um estudo que tem grande valia com a comparação destes parâmetros para a aterros sanitários, mas não se deve excluir totalmente o uso de solos tropicais para o uso de aterro sanitários.

De acordo com os ensaios encontrados e estudos na literatura, pode se dizer que o solo laterítico LG', classificado pela metodologia MCT, compactado com a energia modificada com o mini-Proctor e com teor de umidade ótimo pode ser utilizado na construção de aterros sanitários.

#### 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.

- 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.
- Analisar outros tipos de solo com a metodologia MCT.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8418: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992, 7p.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984-a, 13p.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8418: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984-b, 6p.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8418: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984-c, 3p.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14545: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000, 12p.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: 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://abrelpe.org.br/panorama\\_envio.cfm?ano=2014](http://abrelpe.org.br/panorama_envio.cfm?ano=2014)>. Acesso em: mai/2016
- 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). “The influence of clods on the hydraulic conductivity of a compacted clay.” J. Geotechnical Engineering, ASCE, 116(8), p.1231-1248.
- BRASIL, Lei nº 12.305, 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)> Acesso em: mai/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. Geotechnical Engineering. ASCE, 110(2), 285-300. United Kingdom, 1993. Anais. v.3, p. 1275 – 1292.

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.

DER-SP, (1988). Métodos de ensaio M 191-88, M 192-88, M 193-88, M 194-88 e M 196-88, Diretoria de Engenharia, Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo, São Paulo / SP.

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.

HEAD, K. H. (1986). "Manual of soil laboratory testing, Vol 3: Effective Stress Tests". ELE International Limited, 1ed, London. 1238p.

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

LIMA, L. M. Q., (1995). "Lixo: Tratamento e biorremediação". Hermus Editora Ltda, São Paulo, SP.

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.

NOGAMI, J. S. & VILLIBOR, D. F., (1980). Caracterização e classificação gerais de solos para pavimentação: limitação do método tradicional. Apresentação de uma nova sistemática. In: Reunião Anual de Pavimentação, 15. Belo Horizonte, 1980, Anais. Belo Horizonte, ABPv. p.1 – 38.

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.

Parsons, A.W. 1976. The rapid measurement of the moisture condition of earthwork material. TRL Laboratory Report LR750. Transport Research Laboratory, Crowthorne.

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.

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

## ANEXOS

### Anexo A – Classificação MCT

w	MEAS (g/cm <sup>3</sup> )														
	2	3	4	6	8	12	16	24	32	48	64	96	128	192	256
8,41	0,66	0,70	0,70	0,70	0,74	0,76	0,77	0,80	0,82	0,83	0,85	0,91	0,91	0,91	0,83
12,41	0,71	0,76	0,83	0,85	0,86	0,88	0,89	0,95	0,95	0,98	1,00	1,02	1,04	1,05	1,05
16,32	0,66	0,69	0,71	0,73	0,75	0,78	0,80	0,83	0,88	0,91	0,95	0,98	1,01	1,02	1,03
20,84	0,69	0,72	0,75	0,77	0,80	0,84	0,92	0,96	1,03	1,07	1,14	1,18	1,21	1,24	1,25
24,22	0,78	0,80	0,84	0,88	0,93	0,98	1,06	1,15	1,25	1,30	1,34	1,34	1,34	1,34	1,35

### Anexo B – Ensaio de compactação mini-proctor

Energia Reduzida					
Umidade (%)	29,32	32,78	35,12	38,57	41,25
Diâmetro (mm)	49,84	50,1	49,87	49,53	49,77
Altura (mm)	58,14	49,65	49,85	49,91	49,7
Massa (g)	180,54	155,05	17,54	176,52	163,23
Volume (cm <sup>3</sup> )	113,42	97,88	97,37	96,16	96,69
Msc (g)	149,72	131,15	135,34	130,78	122,79
MEAS (g/cm <sup>3</sup> )	1,32	1,34	1,39	1,36	1,27

Energia Normal					
Umidade (%)	26,41	29,86	33,31	36,91	39,01
Diâmetro (mm)	49,95	49,65	49,87	49,54	49,47
Altura (mm)	53,3	47,1	50,9	48,71	46,21
Massa (g)	172,3	167,82	325,28	336,54	403,62
Volume (cm <sup>3</sup> )	104,44	91,19	99,42	93,89	88,82
Msc (g)	138,91	126,75	144,16	132,38	116,35
MEAS (g/cm <sup>3</sup> )	1,33	1,39	1,45	1,41	1,31

<b>Energia Modificada</b>					
Umidade (%)	19,41	21,91	24,41	26,91	29,41
Diâmetro (mm)	49,97	49,47	49,72	49,77	49,25
Altura (mm)	84,1	89,9	86,9	90,9	114,14
Massa (g)	297,63	319,1	325,28	336,54	403,62
Volume (cm <sup>3</sup> )	164,91	172,81	168,72	176,81	217,43
Msc (g)	249,25	261,75	261,46	265,18	311,9
MEAS (g/cm <sup>3</sup> )	1,51	1,51	1,55	1,50	1,43

#### Anexo C – Ensaio de permeabilidade

<b>Permeabilidade</b>					
Energia Reduzida		Energia Normal		Energia Modificada	
Umidade (%)	k (m/s)	Umidade (%)	k (m/s)	Umidade (%)	k (m/s)
32,78	6,31E-08	29,86	3,25E-09	19,41	8,67E-09
35,12	5,74E-08	33,31	2,96E-09	24,41	8,11E-09
38,57	5,89E-08	36,91	3,13E-09	29,41	8,24E-09

#### Anexo D – Ensaio de resistência à compressão simples

<b>Energia Reduzida</b>					
Ponto Seco		Ponto Ótimo		Ponto Úmido	
Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)
0	0	0	0	0	0
7,25	0,08	2,62	0,07	2,03	0,09
10,87	0,21	4,65	0,19	4,24	0,19
22,42	0,43	6,39	0,34	6,88	0,28
36,13	0,54	7,61	0,51	9,13	0,41
41,36	0,65	10,91	0,69	12,82	0,55
49,37	0,77	12,29	0,86	14,41	0,68
53,21	0,91	17,44	1,05	15,56	0,91
54,31	1,05	26,51	1,19	16,85	1,08
55,78	1,11	37,02	1,38	19,91	1,18

54,12	1,15	44,51	1,51	24,75	1,32
52,93	1,24	48,84	1,65	27,23	1,5
50,21	1,36	47,31	1,72	29,61	1,69
48,55	1,48	45,62	1,78	30,81	1,77
46,32	1,63	43,21	1,82	31,97	1,98
				32,14	2,12
				31,93	2,25
				30,56	2,37

#### Energia Normal

Ponto Seco		Ponto Ótimo		Ponto Úmido	
Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)
0	0	0	0	0	0
9,41	0,6	3,21	0,15	6,01	0,13
21,23	1,21	9,93	0,47	12,27	0,49
43,17	1,84	20,58	0,81	18,13	0,85
81,82	2,43	33,15	1,08	26,39	1,11
144,92	3,02	50,21	1,41	31,56	1,48
182,31	3,72	67,43	1,69	40,33	1,78
212,01	4,43	86,74	2,03	49,31	2,05
190,14	4,82	105,32	2,28	58,89	2,37
164,81	5,01	121,18	2,55	66,31	2,67
		134,25	2,89	78,23	2,93
		141,15	3,06	85,42	3,09
		123,15	3,18	95,21	3,2
		108,91	3,25	91,77	3,29
		97,66	3,38	86,44	3,39
				81,3	3,42

#### Energia Modificada

Ponto Seco		Ponto Ótimo		Ponto Úmido	
Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)
0	0	0	0	0	0
29,41	0,43	9,35	0,48	10,91	0,1
49,85	0,85	13,79	0,68	14,53	0,19
71,35	1,29	21,55	0,97	21,79	0,41

95,63	1,76	36,79	1,24	33,78	0,59
150,67	2,01	73,21	1,55	47,66	0,73
210,57	2,49	139,54	1,73	76,91	0,98
301,57	2,96	241,56	1,95	110,24	1,15
350,31	3,21	302,1	2,31	146,43	1,29
371,22	3,43	328,65	2,59	161,9	1,41
360,1	3,64	319,98	2,7	188,31	1,65
342,15	3,75	291,67	2,79	210,76	1,75
330,76	3,82	255,21	2,84	234,19	1,94
				219,65	2,03
				205,43	2,15

Anexo E – Ensaio de retração volumétrica

Energia Reduzida						
Dias	Ponto Seco		Ponto Ótimo		Ponto Úmido	
	Volume (mm <sup>3</sup> )	Variação (%)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Variação (%)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Variação (%)
0	40809,15	0	40234,03	0	40918,34	0
1	40478,60	-0,81	39827,67	-1,01	36693	-1,57
2	40054,18	-1,85	39441,42	-1,97	36265,2	-2,68
3	39776,68	-2,53	39095,41	-2,83	35740,2	-3,44
4	39527,74	-3,14	38765,49	-3,65	35524,3	-3,87
5	39360,43	-3,55	38648,81	-3,94	35387,4	-4,21
6	39286,97	-3,73	38499,94	-4,31	35402,1	-4,73
7	39278,81	-3,75	38491,90	-4,33	35409,6	-4,77

Energia Normal						
Dias	Ponto Seco		Ponto Ótimo		Ponto Úmido	
	Volume (mm <sup>3</sup> )	Variação (%)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Variação (%)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Variação (%)
0	39831,24	0	40730,84	0	40918,34	0
1	40454,65	-0,89	40381,48	-1,05	36693	-2,05
2	39964,73	-2,12	39896,78	-2,24	36265,2	-3,45
3	39554,47	-3,15	39489,47	-3,24	35740,2	-4,24
4	39251,75	-3,91	39241,01	-3,85	35524,3	-4,44
5	39148,19	-4,17	39057,72	-4,3	35387,4	-4,59
6	39104,37	-4,28	38980,34	-4,49	35402,1	-4,66
7	39096,41	-4,3	38976,26	-4,5	35409,6	-4,67

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	38554,9	0	38954,31	0	38424,2	0
1	40577,82	-0,6	40415,71	-1,01	40367,27	-1,15
2	40149,86	-1,71	40037,85	-1,98	39909,31	-2,31
3	39868,41	-2,44	39737,91	-2,75	39582,09	-3,15
4	39648,65	-3,01	39550,93	-3,23	39387,32	-3,65
5	39625,51	-3,07	39500,29	-3,36	39192,55	-4,15
6	39621,66	-3,08	39488,60	-3,39	39188,65	-4,16
7	39621,66	-3,08	39484,70	-3,4	39188,65	-4,16