

**PROJETO EXECUTIVO DE EXPANSÃO DO ATERRO SANITÁRIO MUNICIPAL
DE CERQUILHO**

Prefeitura Municipal de Cerquilha.

Município de Cerquilha, SP

VOLUME II – MEMORIAL TÉCNICO, QUANTITATIVOS E CRONOGRAMA

**PRF-CER-PEX-EXP-MTC-K-F
OUTUBRO DE 2022**

GEOTECH
GEOTECNIA AMBIENTAL
CONSULTORIA E PROJETOS



SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE GRÁFICOS	4
LISTA DE TABELAS	4
1 INTRODUÇÃO.....	6
2 VOLUMES E BALANÇO DE SOLOS	7
3 SISTEMA DE DRENAGEM DE BASE DE ÁGUAS LIMPAS	9
3.1.1 Dimensionamento Estrutural.....	9
4 SISTEMA DE DRENAGEM DE LIXIVIADOS	11
4.1 Geração de Lixiviados – Retroanálise	11
4.2 Dimensionamento do sistema de drenagem de lixiviados	12
4.2.1 Dimensionamento hidráulico.....	13
4.2.2 Dimensionamento Estrutural.....	15
4.2.3 Reservatório de lixiviados.....	18
4.3 Destinação dos Lixiviados para Tratamento.....	18
5 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS.....	19
5.1 Canaletas de concreto tipo meia-cana	24
5.2 Descidas hidráulicas por canal trapezoidal em geocélulas preenchidas por pedras	26
5.3 Caixa de passagem	27
5.4 Tubos de concreto (travessias subterrâneas)	28
5.5 Sistema de dissipação de energia e retenção de sedimentos nas saídas d'água	30
6 ANÁLISES DE ESTABILIDADE.....	33



6.1	Geometria de análise	33
6.2	Método de Análise.....	33
6.3	Parâmetros de resistência ao cisalhamento	34
6.4	Pressões de Líquidos e Gases - Poropressões.....	36
6.5	Resultados obtidos	37
6.6	Considerações finais	42
BIBLIOGRAFIA		44

LISTA DE FIGURAS

Figura 5-1. Áreas das microbacias de contribuição da drenagem pluvial do empreendimento e suas saídas d'água pluvial.	20
Figura 6-1. Seção de análise de estabilidade A-A' ($r_u = 0,20$; FS = 1,8).....	40
Figura 6-2. Seção de análise de estabilidade B-B' ($r_u = 0,20$; FS = 2,0).....	41
Figura 6-3. Seção de análise de estabilidade C-C' ($r_u = 0,20$; FS = 1,7).	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 6-1: Fator de Segurança em função do r_u	38
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1. Capacidade volumétrica disponível por camadas.	7
Tabela 2-2. Balanço volumétrico do projeto por camadas.....	8
Tabela 3-1. Dimensionamento estrutural dos drenos de base de águas limpas.....	10
Tabela 4-1: Estimativa de geração de lixiviados na Expansão do aterro sanitário	12
Tabela 4-2. Estimativa de geração de lixiviados na Expansão + Ampliação do aterro sanitário.....	12
Tabela 4-3: Dimensionamento Hidráulico dos Drenos Principais de Lixiviados.	14
Tabela 4-4: Dimensionamento Hidráulico dos Drenos Secundários de Lixiviados. ...	14
Tabela 4-5: Dimensionamento Estrutural dos Drenos Principais de Base de Lixiviados.	16
Tabela 4-6. Dimensionamento Estrutural dos Drenos Secundários de Base de Lixiviados.	17
Tabela 5-1. Microbacias da drenagem pluvial permanente do empreendimento.....	21
Tabela 5-2. Intensidade de chuva considerada para cada microbacia de contribuição da drenagem pluvial permanente	22

Tabela 5-3. Contribuições de cada microbacia para dimensionamento da drenagem pluvial permanente	23
Tabela 5-4. Dimensionamento das canaletas de concreto tipo meia-cana no empreendimento	25
Tabela 5-5. Resumo do dimensionamento das descidas hidráulicas	27
Tabela 5-6. Dimensões mínimas das descidas hidráulicas	27
Tabela 5-7: Dimensões das caixas de passagem tipo 1	28
Tabela 5-8: Dimensões das caixas de passagem tipo 2 - canaletas	28
Tabela 5-9. Dimensionamento dos tubos de concreto	29
Tabela 5-10. Especificação da classe de resistência dos tubos de concreto	30
Tabela 5-11. Dimensionamento das bacias de retenção	31
Tabela 5-12. Dimensões das bacias de retenção propostas	31
Tabela 5-13. Dimensionamento da bacia de enrocamento	32
Tabela 5-14. Dimensões definidas para as bacias de enrocamento	32
Tabela 6-1: Parâmetros comuns para análise de estabilidade	34
Tabela 6-2: Valores de Fator de Segurança em função do r_u das seções analisadas.	37
Tabela 6-3. Equação da reta das seções analisadas em função do r_u	38
Tabela 6-4. Critérios de ação em função de análise dos valores de Fator de Segurança	39

1 INTRODUÇÃO

A GEOTECH apresenta o Memorial Técnico, Quantitativos e Cronograma do Projeto Executivo da Expansão do Aterro Sanitário do Município de Cerquillo (SP), localizado no Bairro Capuava, sob responsabilidade da Prefeitura Municipal de Cerquillo.

O projeto aqui apresentado foi elaborado com base nas normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, a NBR 8.419/1992 – *Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos* e NBR 13.896/1997 – *Aterros de Resíduos Não Perigosos – Critérios para Projeto, Implantação e Operação*, além do levantamento planialtimétrico cadastral fornecido pela Prefeitura Municipal de Cerquillo, “*as built*” (datado de 13/05/2022), Complementação do Relatório Ambiental Preliminar – RAP do Aterro Sanitário do Município de Cerquillo (GEOTECH, 1999), Adequações de Projeto para Implantação do Aterro Sanitário do Município de Cerquillo (GEOTECH, 2001) e o Detalhamento e Adequações do Projeto para a Implantação da Segunda Fase do Aterro Sanitário do Município de Cerquillo (GEOTECH, 2005) e Projeto Executivo da Terceira Fase do Aterro Sanitário do Município de Cerquillo (GEOTECH, 2012).

Neste Memorial Técnico são apresentados os procedimentos e os cálculos utilizados para o dimensionamento dos diversos sistemas que compõem o projeto da Expansão do Aterro Sanitário do Município de Cerquillo (SP), bem como as justificativas dos critérios adotados neste projeto.

Nos Quantitativos são apresentados os insumos e serviços necessários para a implantação da expansão proposta, e suas quantidades. Entende-se insumo como sendo: equipamentos e materiais a serem utilizados, bem como instalações físicas.

No Cronograma é apresentada uma estimativa detalhada de duração e ocorrência das atividades previstas para esta expansão.

2 VOLUMES E BALANÇO DE SOLOS

O volume útil para disposição dos resíduos sólidos na área de expansão do aterro é de 193.039 m³, com peso específico dos resíduos sólidos compactados (γ) de 0,7 t/m³, já descontados os volumes de solo a serem utilizados na impermeabilização de base, cobertura diária dos resíduos e cobertura definitiva do aterro.

Desta forma, para estimativa da vida útil das concepções de projeto considerou-se uma recepção diária de 35 t/dia de resíduo, obtendo-se cerca de 15 anos e 1 mês de operação.

Na Tabela 2-1 a seguir é apresentado o volume total espacial e de resíduos, por camadas, conforme o arranjo geral do projeto.

Camada	h	H	Δh (m)	b (m ²)	B (m ²)	Volume (m ³)
1-1	528	531	3	2.178	12.410	19.787
2-1	531	534	3	34.628	37.447	108.085
2-2	534	536	2	12.309	34.628	45.055
3-1	536	541	5	26.574	32.245	146.818
4-1	541	546	5	13.468	22.031	87.875
5-1	546	550	4	2.389	5.423	15.214

Tabela 2-1. Capacidade volumétrica disponível por camadas.

O balanço volumétrico da expansão do aterro é apresentado de acordo com a Tabela 2-2 a seguir.

Descrição	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4	Camada 5	Total	Un.
Acessos Internos	2.483	7.491	5.316	2.694	468	18.451	m³
Balanço de Solo	- 20.952	- 60.637	- 53.660	- 32.153	- 6.426	- 173.827	m³
Balanço de Solo Acumulado	- 20.952	- 81.589	- 135.248	- 167.401	- 173.827	- 173.827	m³
Dique de Solo	233	-	-	-	-	233	m³
Resíduos - Peso Total	6.741	69.996	68.932	40.891	6.479	193.039	t
Resíduos - Volume Total	6.741	69.996	68.932	40.891	6.479	193.039	m³
Volume Espacial	19.787	153.140	146.818	87.875	15.214	422.835	m³
Solo de Aterro de Base	25.494	-	-	-	-	25.494	m³
Solo de Cobertura	7.538	25.934	21.546	13.562	3.439	72.019	m³
Solo de Escavação	33.532	-	-	-	-	33.532	m³
Solo de Impermeabilização	16.116	-	-	-	-	16.116	m³
Solo Operacional	2.620	27.212	26.798	15.897	2.519	75.046	m³
Solo Utilizado	54.483	60.637	53.660	32.153	6.426	207.359	m³
Solo Utilizado Acumulado	54.483	115.120	168.780	200.933	207.359	207.359	m³
Vida Útil	0,5	5,5	5,4	3,2	0,5	15,1	anos
Vida Útil Acumulada	0,5	6,0	11,4	14,6	15,1	15,1	anos

Tabela 2-2. Balanço volumétrico do projeto por camadas.

Com relação ao balanço de solos, como pode ser observado na Tabela 2-2, o volume de solo total utilizado para a implantação e operação da expansão do aterro sanitário, considerando-se toda a vida útil de 15,1 anos de operação, é estimado em cerca de 207.359 m³. Sendo assim, considerando-se que a escavação total a ser realizada na área da expansão em questão fornecerá cerca de 33.532 m³ de solo, que serão aplicados em todo aterro, estima-se que haverá um déficit de solo da ordem de 173.827 m³.

Desta forma, para suprir esta demanda de solo deverão ser utilizados os solos provenientes de jazidas com características geotécnicas adequadas, e de locais licenciados para tal finalidade.

Na Folha 09/12 do Volume III – Folhas de Projeto é apresentado o arranjo geral da expansão do aterro sanitário e sua concepção geométrica final, com as cotas definidas e seus sistemas componentes.

3 SISTEMA DE DRENAGEM DE BASE DE ÁGUAS LIMPAS

A seguir é descrito o dimensionamento do sistema proposto para a drenagem de base de águas limpas (águas de fundação), que irá sob o sistema de impermeabilização de base, de acordo com a implantação da Expansão e possível ampliação futura.

No Volume I, Anexo I - Folhas de Projeto, na folha 03/12 apresentadas as localizações da drenagem de base de águas limpas, e na folha 12/12, seus detalhes.

3.1.1 Dimensionamento Estrutural

A seguir, na Tabela 3-1, apresenta-se o dimensionamento estrutural do tubo de PEAD para drenagem de base de águas limpas, sujeito à pressão de peso de solos e resíduos dispostos, considerando a Expansão e uma futura Ampliação, podendo chegar a 41 m de altura.

Tubo PEAD		
DE	0,11	m
e	0,66	cm
r	5,34	cm
I (e ³ /12)	0,02	cm ³
SDR	16,7	
PE	100	
E	14000	kgf/cm ²
D _L	1,5	
Terreno		
Tipo Solo		
K	0,083	
E'	140	kgf/cm ²
Cargas (Aterro)		
z	41	m
γ	1,00	t/m ³
We (constante)	45,10	kgf/cm
Wt (móvel)	0	kgf/cm

Limite de Curvatura			5%
Spangler			
$\Delta y =$	$\frac{K [(DL \cdot We) + Wt]}{[E \cdot I / (r^3)] + (0,061 \cdot E')}$	=	0,5 cm 4,7%

LEGENDA

DE = Diâmetro Externo

e = espessura da parede

r = Raio Médio

I = Momento de inércia da parede da tubulação por unidade de comprimento
 (I = e³/12)

SDR = *Standard Dimension Ratio* ou RDE - Relação entre Diâmetro Externo Nominal e Espessura Nominal (SDR = DE/e/100)

PE = Classificação conforme tensão circunferencial a 50 anos a temperatura 20°C

E = Módulo de Elasticidade do Material PEAD PE80=8000; PE100=14000

D_L = Fator de Majoração do Peso Próprio (1,5 a favor da segurança)

K = Constante de Leito (Depende do Tipo de Solo)

E' = Módulo de Elasticidade do Material Envolvente

z = Altura da Carga

γ = Peso Específico do Material que está sobre o Tubo

We = Carga do Terreno

Wt = Carga Móvel

Tabela 3-1. Dimensionamento estrutural dos drenos de base de águas limpas.

Desta forma, o tubo especificado no projeto terá sua seção mantida, após o carregamento total sobre sua geratriz superior.

4 SISTEMA DE DRENAGEM DE LIXIVIADOS

A seguir são descritos os dimensionamentos dos sistemas previstos para a drenagem de lixiviados, bem como da estimativa de geração de lixiviados, de acordo com a implantação da Expansão.

4.1 Geração de Lixiviados – Retroanálise

Conforme Projeto Executivo da Terceira Fase do Aterro Sanitário do Município de Cerquilha (Geotech, 2012) no período chuvoso a vazão de lixiviados é de 48,5 m³/dia, que são armazenados temporariamente no reservatório de lixiviados existente, sendo posteriormente bombeados e encaminhados para tratamento na Estação de Tratamento de Efluentes do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Cerquilha (SAAEC), ETE Capuava, que está localizada ao lado do Aterro Sanitário.

Com a implantação da Expansão haverá um acréscimo de área de resíduos de cerca de 22.367 m², o que representa cerca de 53% da área atual (42.064 m²), totalizando aproximadamente 64.431,4 m².

Sendo assim, como a geração de lixiviados é em função da área onde os resíduos são dispostos, o aumento da geração de lixiviados será proporcional ao acréscimo dessa área, ou seja, cerca de 53% no máximo, quando toda a área concebida da Expansão estiver ocupada.

Portanto, na Expansão a geração de lixiviados será no máximo 53% maior que o gerado atualmente, ou seja, com acréscimo de 25,7 m³/dia, totalizando 74,2 m³/dia. Na Tabela 4-1, a seguir, é apresentado o resumo do dimensionamento da geração de lixiviados na Expansão:

ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE LIXIVIADOS			
Parâmetros (unidade)	Atual	Expansão (Acréscimo)	Total
Área de resíduos (m ²)	42.064	22.367 (53%)	64.431
Geração máxima de lixiviados (m ³ /dia)	48,5	25,7 (53%)	74,2

Tabela 4-1: Estimativa de geração de lixiviados na Expansão do aterro sanitário.

No entanto, considerando a área da Expansão (22.367 m²), mais uma nova ampliação de área de cerca de 66.000 m², a área com resíduos seria 88.367 m² maior que a área de resíduos atual (42.064 m²), ou seja, cerca de 210% maior que a área atual do aterro sanitário.

Portanto, com a Expansão + Ampliação a geração de lixiviados será no máximo 210% maior que o gerado atualmente, ou seja, terá um acréscimo de 101,9 m³/dia, totalizando 150,4 m³/dia. Na Tabela 4-1, a seguir, é apresentado o resumo do dimensionamento da geração de lixiviados na Expansão:

ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE LIXIVIADOS			
Parâmetros (unidade)	Atual	Expansão + Ampliação (Acréscimo)	Total
Área de resíduos (m ²)	42.064	88.367 (210%)	130.431
Geração máxima de lixiviados (m ³ /dia)	48,5	101,9 (210%)	150,4

Tabela 4-2. Estimativa de geração de lixiviados na Expansão + Ampliação do aterro sanitário.

4.2 Dimensionamento do sistema de drenagem de lixiviados

O sistema de drenagem de lixiviados da Expansão foi definido como sendo composto por malhas de drenos horizontais de lixiviados na base, considerando duas linhas de drenagem principais e drenagens secundárias interligadas na drenagem principal. Para a drenagem nas camadas, todos estando interligados aos drenos verticais de biogás, como é o que ocorre atualmente, no aterro de Cerquilha.

Na drenagem principal de base de lixiviados os drenos foram definidos como sendo de Tubos de PEAD perfurado (PE-100/DE 200 mm e espessura de 11,9 mm/PN 10 perfurados com furos de Ø 12 mm) envolto por brita-rachão-brita e geotêxtil não tecido

de polipropileno de 200 g/m² (o geotêxtil deve ser aplicado entre o solo e a camada de brita/rachão/brita e sem contato com os resíduos, na parte superior).

Na drenagem secundária de base de lixiviados os drenos foram definidos como sendo de Tubos de PEAD perfurado (PE-100/DE 160 mm e espessura de 9,5 mm/PN 10 perfurados com furos de Ø 12 mm) envolto por brita-rachão-brita e geotêxtil não tecido de polipropileno de 200 g/m² (o geotêxtil deve ser aplicado entre o solo e a camada de brita/rachão/brita e sem contato com os resíduos, na parte superior).

Na drenagem de camada dos lixiviados, o dreno foi definido como sendo de Tubo de PEAD perfurado (PE-100/DE 160 mm e espessura de 9,5 mm/PN 10 perfurados com furos de Ø 12 mm) em trincheiras de 0,60 m de largura por 0,60 m de altura, preenchidos por brita 4, com interligação aos drenos verticais de biogás.

A seguir são apresentados os dimensionamentos hidráulico e estrutural da drenagem de base de lixiviados.

Como o dreno de camadas de lixiviados é do mesmo tipo do de base, os dimensionamentos da drenagem de base de lixiviados também se aplicam aos de camadas.

4.2.1 Dimensionamento hidráulico

Os drenos de base de lixiviados deverão ser implantados com declividade mínima de 2% para garantir um escoamento adequado, que propicie uma velocidade mínima que minimize a sedimentação dos sólidos nos tubos.

No Volume I, Anexo I – Folhas de Projeto, nas folhas 04/12 e 08/12 são apresentadas as localizações das drenagens de base e de camadas de lixiviados, e na folha 12/12, seus detalhes.

Para a definição das dimensões e características dos Tubos de PEAD, os mesmos foram dimensionados, comprovando sua capacidade de atender seguramente à vazão

de lixiviados da Expansão e uma futura ampliação, conforme demonstrado na Tabela 4-3 a seguir:

DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DOS DRENOS PRINCIPAIS DE LIXIVIADOS (BASE)												
Equação de Manning (Seção Parcial): $Q = AR_h^{2/3}S^{1/2}/\eta$												
Material	Classificação* - PE	Standard Dimension Ratio - SDR**	Pressão Nominal - PN (bar)	Diâmetro Externo - DE (mm)	Espessura Tubo - e (mm)	Declividade - S (m/m)	Profundidade Norma / Diâmetro Interno - Y_n / DI (m)	Profundidade Normal - Y_n (m)	Coefficiente de Manning - η	Área Seção Interna - A (m ²)	Vazão - Q (m ³ /s)	Vazão - Q (m ³ /dia)
PEAD	100	17	10	200	11,9	0,020	0,300	0,045	0,012	0,0063	0,007	627

* Classificação conforme tensão circunferencial a 50 anos na temperatura 20°C

** Relação entre Diâmetro Externo Nominal e Espessura Nominal

Tabela 4-3: Dimensionamento Hidráulico dos Drenos Principais de Lixiviados.

DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DOS DRENOS SECUNDÁRIOS DE LIXIVIADOS (BASE)												
Equação de Manning (Seção Parcial): $Q = AR_h^{2/3}S^{1/2}/\eta$												
Material	Classificação* - PE	Standard Dimension Ratio - SDR**	Pressão Nominal - PN (bar)	Diâmetro Externo - DE (mm)	Espessura Tubo - e (mm)	Declividade - S (m/m)	Profundidade Norma / Diâmetro Interno - Y_n / DI (m)	Profundidade Normal - Y_n (m)	Coefficiente de Manning - η	Área Seção Interna - A (m ²)	Vazão - Q (m ³ /s)	Vazão - Q (m ³ /dia)
PEAD	100	17	10	160	9,5	0,020	0,300	0,0423	0,012	0,0039	0,004	331

* Classificação conforme tensão circunferencial a 50 anos na temperatura 20°C

** Relação entre Diâmetro Externo Nominal e Espessura Nominal

Tabela 4-4: Dimensionamento Hidráulico dos Drenos Secundários de Lixiviados.

Os Tubos de PEAD propostos para drenagem principal de lixiviados de base apresenta capacidade de vazão de 627 m³/dia, bastante superior à vazão de lixiviados estimada com acréscimo da Expansão + Ampliação, de 150 m³/dia, demonstrando assim que a dimensão adotada atende a demanda de lixiviados.

Essa dimensão foi superdimensionada, para prevenir eventuais colmatações dos tubos.

Sendo assim, os Tubos de PEAD propostos para a drenagem principal de lixiviados de base é:

- Tubo de PEAD ISO 4427/PE-100/DE 200 mm/e 11,9 mm/ PN 10.

Os Tubos de PEAD propostos para drenagem secundária de lixiviados de base apresenta capacidade de vazão de 331 m³/dia, bastante superior à vazão de lixiviados estimada com acréscimo da Expansão + Ampliação, de 150 m³/dia, demonstrando assim que a dimensão adotada atende a demanda de lixiviados.

Essa dimensão foi superdimensionada, para prevenir eventuais colmatações dos tubos.

Sendo assim, os Tubos de PEAD propostos para a drenagem principal de lixiviados de base é:

- Tubo de PEAD ISO 4427/PE-100/DE 160 mm/e 9,5 mm/ PN 10.

4.2.2 Dimensionamento Estrutural

A seguir, na Tabela 4-5 e Tabela 4-6, apresenta-se o dimensionamento estrutural dos tubos de PEAD para drenagem de lixiviados de base (principal e secundário), sujeito à pressão de peso de solos e resíduos dispostos, considerando a Expansão e uma futura Ampliação, podendo chegar a 40 m de altura.

Tubo PEAD		
DE	0,20	m
e	1,19	cm
r	9,70	cm
I (e ³ /12)	0,14	cm ³
SDR	16,8	
PE	100	
E	14000	kgf/cm ²
D _L	1,5	
Terreno		
Tipo Solo		
K	0,083	
E'	140	kgf/cm ²
Cargas (Aterro)		
z	40	m
γ	1,00	t/m ³
We (constante)	80,00	kgf/cm
Wt (móvel)	0	kgf/cm

Spangler			
$\Delta y =$	$K [(DL \cdot We) + Wt]$	=	0,9 cm
	$[E \cdot I / (r^3)] + (0,061 \cdot E')$		4,7%

LEGENDA

DE = Diâmetro Externo

e = espessura da parede

r = Raio Médio

I = Momento de inércia da parede da tubulação por unidade de comprimento
 (I = e³/12)

SDR = *Standard Dimension Ratio* ou RDE - Relação entre Diâmetro Externo Nominal e Espessura Nominal (SDR = DE/e/100)

PE = Classificação conforme tensão circunferencial a 50 anos a temperatura 20°C

E = Módulo de Elasticidade do Material PEAD PE80=8000; PE100=14000

D_L = Fator de Majoração do Peso Próprio (1,5 a favor da segurança)

K = Constante de Leito (Depende do Tipo de Solo)

E' = Módulo de Elasticidade do Material Envolvente

z = Altura da Carga

γ = Peso Específico do Material que está sobre o Tubo

We = Carga do Terreno

Wt = Carga Móvel

Tabela 4-5: Dimensionamento Estrutural dos Drenos Principais de Base de Lixiviados.

Tubo PEAD		
DE	0,16	m
e	0,95	cm
r	7,76	cm
I (e ³ /12)	0,07	cm ³
SDR	16,8	
PE	100	
E	14000	kgf/cm ²
D _L	1,5	
Terreno		
Tipo Solo		
K	0,083	
E'	140	kgf/cm ²
Cargas (Aterro)		
z	40	m
γ	1,00	t/m ³
We (constante)	64,00	kgf/cm
Wt (móvel)	0	kgf/cm

Limite de Curvatura			5%
Spangler			
$\Delta y =$	$\frac{K [(DL \cdot We) + Wt]}{[E \cdot I / (r^3)] + (0,061 \cdot E')}$	=	0,7 cm 4,7%

LEGENDA

DE = Diâmetro Externo

e = espessura da parede

r = Raio Médio

I = Momento de inércia da parede da tubulação por unidade de comprimento
 (I = e³/12)

SDR = *Standard Dimension Ratio* ou RDE - Relação entre Diâmetro Externo Nominal e Espessura Nominal (SDR = DE/e/100)

PE = Classificação conforme tensão circunferencial a 50 anos a temperatura 20°C

E = Módulo de Elasticidade do Material PEAD PE80=8000; PE100=14000

D_L = Fator de Majoração do Peso Próprio (1,5 a favor da segurança)

K = Constante de Leito (Depende do Tipo de Solo)

E' = Módulo de Elasticidade do Material Envolvente

z = Altura da Carga

γ = Peso Específico do Material que está sobre o Tubo

We = Carga do Terreno

Wt = Carga Móvel

Tabela 4-6. Dimensionamento Estrutural dos Drenos Secundários de Base de Lixiviados.

Desta forma, os tubos especificados no projeto terão suas seções mantidas, após o carregamento total sobre sua geratriz superior.

4.2.3 Reservatório de lixiviados

A drenagem de base de lixiviados da Expansão se interligará a drenagem de base de lixiviados existente, com encaminhamento para o reservatório existente.

4.3 Destinação dos Lixiviados para Tratamento

Os lixiviados gerados tanto no maciço existente quanto na Expansão deverão ser encaminhados conforme atualmente, do reservatório existente para tratamento na Estação de Tratamento de Efluentes do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Cerquilha (SAAEC), ETE Capuava, que está localizada ao lado do Aterro Sanitário.

5 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS

Os elementos de projeto foram calculados e dimensionados de acordo com os princípios de engenharia para aterros sanitários, seguindo as normas da ABNT, NBR 8419/1992 (Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos – Procedimento) e NBR 13896/1997 (Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação) e publicações de órgãos técnicos e ambientais.

Os parâmetros adotados estão indicados a seguir, para cada tipo de elemento de projeto.

Para o cálculo das vazões de cheias foi utilizado o Método Racional, aconselhado para áreas até 2 km², segundo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo – DAEE (2005). Os dados climáticos do município de Cerquillo foram obtidos através do software “Plúvio 2.1 - Chuvas intensas no Brasil”.

Desse modo, os critérios para dimensionamento adotados foram os seguintes:

A) Período de retorno

É o período de tempo em que um determinado evento hidrológico é igualado ou superado pelo menos uma vez.

Foi adotado a favor da segurança o período de retorno de 10 anos para o sistema de drenagem pluvial do empreendimento proposto.

B) Área da Bacia

É a área de contribuição a ser drenada. No caso, uma área total de 76.691 m², que pôde ser dividida em 17 microbacias, conforme apresentado na figura a seguir:



Figura 5-1. Áreas das microbacias de contribuição da drenagem pluvial do empreendimento e suas saídas d'água pluvial.

Dessa forma, a área total a ser drenada no empreendimento será de 0,077 km², as áreas dessas microbacias são apresentadas na tabela a seguir:

Microbacia	Área (km ²)
1	0,003
2	0,003
3	0,003
4	0,004
5	0,003
6	0,003
7	0,003
8	0,005
9	0,003
10	0,008
11	0,005
12	0,007
13	0,006
14	0,005
15	0,007
16	0,006
17	0,004
TOTAL	0,077

Tabela 5-1. Microbacias da drenagem pluvial permanente do empreendimento.

C) Coeficiente de *runoff* ou escoamento superficial (C)

Este coeficiente é um parâmetro adimensional que varia de 0 a 1, e segundo DAEE (2005), é estimado com base em características da bacia, representando seu grau de impermeabilização ou de urbanização. Quanto menor a possibilidade de a água precipitada infiltrar-se no solo, ou de ficar retida pela vegetação, maior será a parcela que se transformará em escoamento superficial direto, resultando um valor mais elevado para o coeficiente C.

Nesse sentido, foram adotados valores característicos para lotes com 2.000 m² ou mais (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1986), sendo de 0,44, para a área do aterro sanitário.

D) Tempo de concentração (t_c)

Segundo Tomaz (2010) é o tempo que leva uma gota de água mais distante para chegar até o trecho considerado na bacia.

Para determinar este dimensionamento foi considerado o tempo de concentração de 5 min.

E) Intensidade de chuva (i)

É a intensidade média da precipitação sobre toda a área drenada, de duração igual ao tempo de concentração em mm/h.

$$i = \frac{K \cdot T_r^a}{(t_c + b)^c}$$

onde:

- i = intensidade de chuva (mm/h)
- T_r = Período de retorno (anos)
- t_c = Tempo de concentração (min)
- K, a, b, c = Parâmetros da equação de Intensidade, Duração e Frequência da Precipitação

Os valores dos parâmetros K, a, b e c , foram obtidos, através do software “Plúvio 2.1” (GPRH, 2006), para a localidade de Cerquilha.

Portanto, substituindo os valores para a equação de intensidade de chuva, obteve-se o maior valor, para ser adotado no dimensionamento hidráulico:

INTENSIDADE DE CHUVA (i)						
K	a	b	c	T_r (anos)	t_c (min)	i (mm/h)
1997,697	0,186	17,772	0,8810	10	5,00	237,09

Tabela 5-2. Intensidade de chuva considerada para cada microbacia de contribuição da drenagem pluvial permanente.

F) Pico de vazão

O Método Racional para a estimativa do pico de cheia resume-se, fundamentalmente, para área não superior a 2 km², no emprego da chamada “fórmula racional”:

$$Q_{\max} = (C.i.A) / 3,6$$

onde:

- Q_{\max} = pico máximo de vazão em m³/s
 i = intensidade de chuva (mm/h)
 A = área drenada (km²)
 C = coeficiente de escoamento superficial (0,44 para a área do aterro sanitário)

Como já citado, para a área de readequação foram subdivididas 17 microbacias, que foram consideradas para a determinação das vazões de pico, necessárias para o dimensionamento dos diversos sistemas componentes da drenagem pluvial permanente.

Na tabela a seguir são apresentadas as vazões de pico em cada microbacia que contribuirá para a drenagem pluvial permanente:

VAZÃO DE PICO (Q)				
Bacia	C (coef. run-off)	i (mm/h)	A (km ²)	Q (m ³ /s)
1	0,44	195,28	0,003	0,06
2	0,44	195,28	0,003	0,06
3	0,44	195,28	0,003	0,06
4	0,44	195,28	0,004	0,08
5	0,44	195,28	0,003	0,07
6	0,44	195,28	0,003	0,08
7	0,44	195,28	0,003	0,08
8	0,44	195,28	0,005	0,11
9	0,44	195,28	0,003	0,07
10	0,44	195,28	0,008	0,19
11	0,44	195,28	0,005	0,12
12	0,44	195,28	0,007	0,17
13	0,44	195,28	0,006	0,14
14	0,44	195,28	0,005	0,12
15	0,44	195,28	0,007	0,16
16	0,44	195,28	0,006	0,14
17	0,44	195,28	0,004	0,11
TOTAL	-	-	0,077	1,830

Tabela 5-3. Contribuições de cada microbacia para dimensionamento da drenagem pluvial permanente.

Portanto, substituindo os valores para a equação de pico de vazão, obteve-se:

$$Q_{\max} = 1,830 \text{ m}^3/\text{s} \text{ ou } 1.830 \text{ l/s.}$$

A seguir são apresentadas as dimensões dos equipamentos de drenagem pluvial propostos.

No Volume I – Anexo I – Folhas 03/12 a 09/12 é possível visualizar em planta os equipamentos de drenagem pluvial previstos e seus fluxos de escoamento, e na Folha 11/12 os detalhes desses equipamentos.

5.1 Canaletas de concreto tipo meia-cana

As canaletas são os elementos responsáveis pela captação das águas pluviais que correm sobre os taludes, bermas, acessos e “platôs”.

A conformação das bermas será executada garantindo-se os caimentos previstos, tanto transversal como longitudinalmente.

Para o dimensionamento das canaletas no aterro sanitário foram consideradas as linha de canaletas com a maiores áreas de captação de águas pluviais.

A partir daí, foram utilizadas a fórmula racional e o *software* CANAL (GPRH, 2000) para determinar a vazão de pico nessa área e o diâmetro da canaleta, respectivamente, assumindo como critérios de projeto: coeficiente de escoamento superficial de 0,44, intensidade de chuva (195,28 mm/h), coeficiente de rugosidade de Manning de 0,015 (concreto), declividade de 2% e folga (*free-board*), conforme as vazões de pico.

Na tabela a seguir é apresentado o resumo do dimensionamento das canaletas de concreto tipo meia-cana que deverão ser implantadas no empreendimento.

CÁLCULO DE VAZÃO DE PICO (FÓRMULA RACIONAL)										
Dados de entrada					Resultados					
Área	C	i (mm/h)	S (km ²)	Q (m ³ /s)						
Bermas	0,44	195,28	0,0013	0,04						
Microbacia 1 a 2	0,44	195,28	0,0053	0,13						
Microbacia 1 a 5	0,44	195,28	0,0144	0,34						
Microbacia 1 a 9	0,44	195,28	0,0286	0,68						
Microbacia 1 a 10	0,44	195,28	0,0363	0,87						

DIMENSIONAMENTO CANALETA (software CANAL)										
Dados de entrada					Resultados					
Área	Vazão (m ³ /s)	Declividade (m/m)	Coef. Manning	Folga (m/m)	Prof. Normal (m)	Diâmetro (m)	N° Froude	Velocidade (m/s)	Perímetro molhado (m)	Diâmetro Adotado (m)
Bermas	0,04	0,02	0,015	0,03	0,12	0,30	1,61	1,51	0,41	0,30
Microbacia 1 a 2	0,13	0,02	0,015	0,05	0,20	0,41	1,65	2,04	0,63	0,50
Microbacia 1 a 5	0,34	0,02	0,015	0,13	0,27	0,66	1,83	2,59	0,92	0,80
Microbacia 1 a 9	0,68	0,02	0,015	0,15	0,35	0,85	1,91	3,08	1,19	1,00
Microbacia 1 a 10	0,87	0,02	0,015	0,18	0,37	1,02	1,99	3,26	1,32	1,10

Tabela 5-4. Dimensionamento das canaletas de concreto tipo meia-cana no empreendimento.

Dessa forma, no empreendimento, as canaletas de concreto serão do tipo meia-cana, com dimensões de \varnothing 0,30 m, \varnothing 0,50 m, \varnothing 0,80 m, \varnothing 1,00 m e \varnothing 1,10 m e declividade mínima de 2%.

5.2 Descidas hidráulicas por canal trapezoidal em geocélulas preenchidas por pedras

As descidas d'água pluvial no empreendimento proposto se darão por escadas d'água com revestimento de geocélulas, preenchidas por pedras e tela tipo alambrado. No aterro sanitário, as descidas deverão acompanhar a declividade do talude e continuar sobre as bermas. É prevista a utilização de um geotêxtil (RT-16) tipo não tecido de polipropileno entre as descidas hidráulicas e os solos de apoio ou contato.

A seção transversal dessas escadas será trapezoidal, tendo a geocélula 0,20 m de espessura, com inclinação do talude lateral interno da escada de 1:2 (V:H) nos taludes e 1:3 (V:H) nas bermas.

Para o dimensionamento dessas escadas foi adotado um coeficiente de rugosidade de Manning de 0,030 e para o cálculo da lâmina d'água (Z), foram consideradas as vazões obtidas em cada microbacia. Sendo assim, para este dimensionamento foi utilizado o método dos parâmetros adimensionais (AZEVEDO NETO et al, 1998), sendo:

$$Q = \left[\frac{y}{b} + m \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right] \cdot \left[\frac{y + m \frac{y^2}{b}}{1 + 2 \frac{y}{b} \sqrt{1 + m^2}} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot b^3 \cdot I^2 \cdot \frac{1}{n}$$

Q = Vazão de pico (m³/s)

y = profundidade de escoamento (m)

b = largura do canal (m)

m = indicador horizontal do talude (m)

I = declividade (m/m)

n = coeficiente de rugosidade de Manning

Nas tabelas a seguir são apresentados os resumos dos dimensionamentos das descidas hidráulicas propostas, cujas dimensões mínimas dimensionadas atendem as vazões em cada área de contribuição das descidas hidráulicas:

DIMENSIONAMENTO DAS DESCIDAS HIDRÁULICAS		
Parâmetros	Descidas Hidráulicas	
	Microbacia 10 (Talude)	Microbacia 10 (Berma)
DADOS DE ENTRADA		
[y] Altura da lâmina d'água (m)	0,10	0,10
[f] Folga - <i>free-board</i>	0,10	0,10
[z] Altura da escada	0,20	0,20
[B] Largura da base interior interna (m)	0,70	2,00
[m] Indicador horizontal do talude (m)	2,00	3,00
[l] Declividade (m/m)	0,50	0,02
[n] Coeficiente de rugosidade de Manning	0,03	0,03
RESULTADOS		
$Q = \left[\frac{y}{B} + m \left(\frac{y}{B} \right)^2 \right] \cdot \left[\frac{\frac{y}{B} + m \left(\frac{y}{B} \right)^2}{1 + 2 \frac{y}{B} \sqrt{1 + m^2}} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot B^{\frac{8}{3}} \cdot l^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{n}$	0,39	0,21
[Q] Vazão da escada (m³/s)		

Tabela 5-5. Resumo do dimensionamento das descidas hidráulicas.

Local	Q (m³/s)	z (m)	B (m)	L (m)
Nos Taludes	0,39	0,20	0,70	1,50
Nas Bermas	0,21	0,20	2,00	3,20

Tabela 5-6. Dimensões mínimas das descidas hidráulicas.

z = Altura da lâmina d'água (m)

B = Largura plana da escada - base inferior (m)

L = Largura plana da escada - superior (m)

5.3 Caixa de passagem

Nos pontos onde se torna necessário a mudança de direção dos elementos de drenagem, o encontro de drenagens e a diminuição da velocidade/energia das águas para o adequado encaminhamento das vazões coletadas, devem-se implantar caixas de passagem.

Apresenta-se as dimensões das caixas de passagem propostas:

- P1 → Transição entre descidas hidráulicas, canaletas e tubos de concreto.

CAIXA DE PASSAGEM (ENTRE DESCIDAS HIDRÁULICAS, CANALETAS/CANAIS E TUBOS DE CONCRETO)					
Tipo	Descida Hidráulica (m)	Canaleta/Canal (m)	Tubo \varnothing (m)	Dimensões (L x C x h)	Espessura (m)
P1-A	E1-T	Canaleta Tipo 1 e 2	Tipo 1	1,90 x 0,70 x 1,40 m	0,15
P1-B	E1-T	Canaleta Tipo 3 a 5	Tipo 1	1,90 x 1,30 x 1,50 m	0,15

Tabela 5-7: Dimensões das caixas de passagem tipo 1.

L= Largura interna da caixa (m)

C = Comprimento interno da caixa (m)

h = Altura interna da caixa (m)

- P2 → Mudanças de direção e diminuição de energia de escoamento nas canaletas de concreto tipo meia-cana;

CAIXA DE PASSAGEM (ENTRE CANALETAS)			
\varnothing Canaleta (m)	Tipo	Dimensões (L x L x h)	Espessura (m)
0,30	2A	0,70 x 0,70 x 0,50 m	0,15
0,50	2B	0,90 x 0,90 x 0,70 m	0,15
1,00	2C	1,50 x 1,50 x 1,00 m	0,15

Tabela 5-8: Dimensões das caixas de passagem tipo 2 - canaletas.

L= Largura interna da caixa (m)

h = Altura interna da caixa (m)

5.4 Tubos de concreto (travessias subterrâneas)

Para este dimensionamento, foram consideradas as vazões finais coletadas pelas caixas de passagem e caixa de dissipação de energia e retenção de sedimentos e com isso utilizou-se o programa CANAL, assumindo como critérios de projeto: coeficiente de rugosidade de Manning de 0,015 (concreto), a relação entre altura da lâmina de água e diâmetro do tubo: $(y / D) < 0,82$.

Foram obtidos os diâmetros adequados para os tubos de concreto, conforme as maiores vazões das microbacias, apresentado na tabela a seguir:

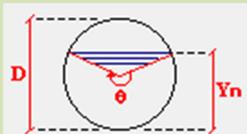
TUBO DE CONCRETO	
DADOS DE ENTRADA	Microbacia
	12
Vazão (m ³ /s)	0,17
Declividade (m/m)	0,020
RESULTADOS	Microbacia
	12
Diâmetro [D] (m)	0,34
Profundidade normal [Yn] (m)	0,28
Velocidade (m/s)	2,09
Diâmetro adotado (m)	0,40

Tabela 5-9. Dimensionamento dos tubos de concreto.

Para os tubos de concreto nas travessias entre escadas d'água, conforme as maiores vazões, foi definida a seguinte dimensão dos tubos de concreto: \varnothing 0,40 m.

Para a especificação da classe de resistência dos tubos de concreto definidos, foi utilizado o programa computacional "Tubos Classe 2.4", da Associação Brasileira dos Fabricantes de Tubos de Concreto - ABTC e Instituto Brasileiro de Telas Soldadas - IBTS.

Na tabela a seguir apresentam-se os critérios de projeto (a favor da segurança) e seus resultados, para o tubo de concreto projetado:

TUBO DE CONCRETO – ESPECIFICAÇÃO DA CLASSE DE RESISTÊNCIA	
DADOS DE ENTRADA	Ø 400 mm
Dados de Instalação	
Tipo de instalação	Vala
Tipo de terreno	Solo saturado
Peso específico do solo (kN/m ³)	19,2
Altura de terra sobre o tubo (m)	0,60
Largura da vala do tubo (m)	1,98
Dados de Sobrecarga	
Natureza	Rodoviária
Tipo de Tráfego	Classe 45
Peso do veículo (kN)	450
Dados da Base Sob o Tubo	
Tipo de Base	Classe D
Fator de equivalência	1,1
γ_f	1,5
RESULTADOS	Ø 400 mm
Resistência necessária (kN/m)	37,62
Tubos Armados (kN/m)	54,00
Tubos Simples	Não existe
Classe do Tubo	PA3

Tabela 5-10. Especificação da classe de resistência dos tubos de concreto.

5.5 Sistema de dissipação de energia e retenção de sedimentos nas saídas d'água

Nas oito saídas d'água propostas (S-A a S-H), foi definido um sistema de dissipação de energia e retenção de sedimentos, através de 2 tipos de equipamentos que funcionarão associadamente:

- Bacias de retenção; e
- Bacias de enrocamento.

Primeiramente, as águas drenadas serão encaminhadas à bacia de retenção, e posteriormente, para a bacia de enrocamento, interligadas entre si.

Esses dois equipamentos terão como função diminuir as velocidades elevadas de escoamento, reter sedimentos e direcionar adequadamente as águas pluviais aos cursos d'água de jusante.

Na Tabela 5-11 são apresentados os dimensionamentos das bacias de retenção propostas:

BACIA DE RETENÇÃO		
DADOS DE ENTRADA	Saída (S-C)	Saída (S-A)
Vazão de Pico (m ³ /s)	0,17	0,87
Vazão de Pico (m ³ /min)	10,11	52,03
Duração da Chuva (seg)	30	30
<i>Free-board</i> (m)	0,50	0,50
Altura molhada (m)	1,00	1,00
Altura interna total - h (m)	1,50	1,50
RESULTADOS	Saída (S-C)	Saída (S-A)
Vol. Enxurrada (m ³)	3	13
Área Circunferência (m ²)	2,53	13,01
Diâmetro Médio (m)	1,79	4,07
Diâmetro Topo + <i>free-board</i> Adotado (m)	4,00	7,00
Profundidade total (m)	1,50	1,50
Inclinação da parede interna (m/m)	1:1	1:1
Volume Total do Reservatório (m³)	3	20

Tabela 5-11. Dimensionamento das bacias de retenção.

Na Tabela 5-12 são apresentadas as dimensões das bacias de retenção.

Tipo	Saídas	Ø Tubo (m)	Altura Interna Total (m)	Diâmetro Topo (m)	Diâmetro Fundo (m)
R1	S-B a S-H	0,40	1,50	4,00	1,00
R2	S-A	0,80	1,50	7,00	4,00

Tabela 5-12. Dimensões das bacias de retenção propostas.

Quanto ao dimensionamento da bacia de enrocamento, na tabela a seguir é apresentado o resumo do dimensionamento desse equipamento:

BACIA DE ENROCAMENTO					
DADOS DE ENTRADA					
Parâmetros		Valores			
[D] Diâmetro interno do tubo (m)		0,40	0,80		
[dp] Altura da lâmina d'água no tubo (m)		0,33	0,66		
[v] Velocidade (m/s)		2,32	3,68		
[g] Aceleração da gravidade (m ² /s)		9,81	9,81		
RESULTADOS					
Parâmetros		Equação		Valores	
[Wa] Largura da Bacia (m)		$Wa = 3.D$		1,20	2,40
[F] N° Froude		$F = v/(g.dp)^{0.5}$		3,96	8,59
[La] Comprimento da Bacia (m)		$La = D.[8 + 17.log(F)]$		0,13	0,29
[ds] Diâmetro da pedra (m)		$ds = 0,25.D.F$		0,26	0,58
[Da] Profundidade da Bacia (m)		$Da = 2ds$		1,20	2,40

Tabela 5-13. Dimensionamento da bacia de enrocamento.

No total foram definidas onze bacias de enrocamento, dos tipos B1 e B2, conforme apresentado na tabela a seguir:

DIMENSÕES DEFINIDAS PARA BACIA DE ENROCAMENTO					
Tipo	Local	Wa (m)	La (m)	ds (m)	Da (m)
B1	S-B a S-H	1,20	4,00	0,15	0,30
B2	S-A	2,40	8,60	0,30	0,60

Wa = Largura da Bacia (m)

La = Comprimento da bacia (m)

ds = Diâmetro da pedra (m)

Da = Profundidade da bacia (m)

Tabela 5-14. Dimensões definidas para as bacias de enrocamento.

6 ANÁLISES DE ESTABILIDADE

A análise de estabilidade realizada reproduz as condições geotécnicas das seções consideradas mais críticas, conforme o arranjo final do Projeto Executivo de Expansão do Aterro Sanitário do Município de Cerquilha, considerando os taludes de escavação e de resíduos, disposto e a ser disposto.

6.1 Geometria de análise

No âmbito do projeto de expansão foram analisadas três seções de análise e estabilização de taludes do maciço de resíduos, com suas respectivas localizações apresentadas no Volume I - Anexo I - Folhas de Projeto, na Folha 10/12. Reitera-se que estas seções foram escolhidas por serem consideradas as mais críticas de acordo com conformação final e etapas de faseamento do maciço de resíduos.

O traçado dos perfis geológicos-geotécnicos nas diversas seções levantadas e a caracterização dos materiais naturais componentes auxiliaram na definição das geometrias e considerações geotécnicas relativas aos taludes e ao comportamento esperado dos mesmos.

6.2 Método de Análise

Para as análises de estabilidade foi utilizado o método de equilíbrio limite baseado no método das lamelas apresentado por Spencer (1967).

O cálculo numérico considera superfícies circulares e não circulares, com possibilidade de representação de vários tipos de materiais, possibilidades de simulação de poropressões por pontos, excessos de poropressão, linhas piezométricas e coeficiente ru de Bishop e Morgenstern (1960), com pesquisa de superfície crítica, de mínimo fator de segurança.

O software utilizado busca, automaticamente, a superfície de menor fator de segurança, de forma que, em todas as análises, são definidas superfícies mais críticas de cada seção.

6.3 Parâmetros de resistência ao cisalhamento

Apesar da heterogeneidade aparente dos resíduos, os parâmetros de resistência médios que preponderam na estabilidade de grandes massas são os representativos dos maiores volumes, que no caso, são os resíduos de origem domiciliar.

As superfícies circulares de ruptura consideradas no estudo estiveram, em geral, no interior da massa de resíduos, passando tangencialmente pelos solos de alteração de rocha, considerados mais resistentes que os resíduos, conforme constatado nos resultados das sondagens e ensaios de laboratório realizados nos solos e avaliação por dados de solos semelhantes publicados na literatura técnica. Na Tabela 6-1, a seguir, são apresentados os valores dos parâmetros adotados na análise de estabilidade.

nº	Material	c' (KPa)	ϕ' (°)	γ (KN/m ³)	Referência
1.	Resíduo a dispor	13,5	22,00	10	Benvenuto & Cunha (1991)
2.	Resíduo disposto	13,5	22,00	10	Benvenuto & Cunha (1991)
3.	Solo natural	19,0	31,00	19	Pinto et al (1993)

Tabela 6-1: Parâmetros comuns para análise de estabilidade.

Onde:

- c' = coesão média efetiva;
- ϕ' = ângulo de atrito médio efetivo;
- γ = peso específico médio.

Deve ser considerado que os parâmetros apresentados, são considerados conservativos e representam o comportamento médio da massa de resíduos e, a aleatoriedade e variabilidade inerente às peculiaridades dos resíduos a serem

dispostos, são representados pela média do comportamento dos resíduos preponderantes na disposição, no caso de rupturas gerais, como as que se analisam.

Os valores dos parâmetros de resistência dos resíduos a dispor foram obtidos a partir da retroanálise de ruptura realizada no Aterro Sanitário Bandeirantes (Benvenuto e Cunha, 1991, 1992) e no Aterro Sanitário Sítio São João, na ocasião da ruptura, em 2007. Estes parâmetros têm sido referência para análises de estabilidade em aterros onde as **condições operacionais são desconhecidas, a favor da segurança.**

No Gráfico 6-1, a seguir, observa-se que dentre todas as envoltórias médias de Mohr-Coulomb dos resíduos estudadas e consagradas nas literaturas técnicas, conforme descrito por ZEKOS *et al* (2010), a envoltória média adotada nesta análise de estabilidade, (BENVENUTO & CUNHA, 1991) é a considerada mais conservadora existente.

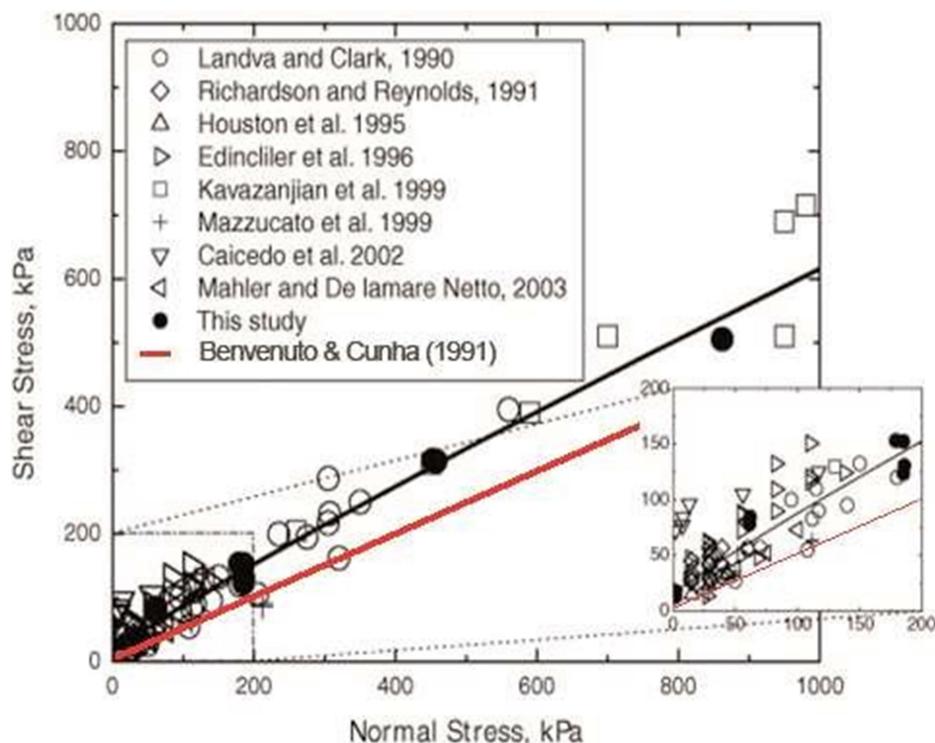


Gráfico 6-1. Resultados de ensaios de cisalhamento direto em resíduos sólidos urbanos – RSU (Adaptado de Zekkos, 2010).

Os valores dos parâmetros de resistência para os solos naturais foram considerados de acordo com a publicação da ABMS (1993), para solos semelhantes do interior do Estado de São Paulo. Conforme descrito anteriormente, ressalta-se que os solos naturais possuem boa capacidade de carga, portanto, não são condicionantes geotécnicos para instabilidade do maciço de resíduos.

6.4 Pressões de Líquidos e Gases - Poropressões

O desempenho dos sistemas de drenagem de líquidos e gases é a base para a estabilidade dos maciços sanitários, adotando-se critérios de poropressões compatíveis com a concepção e o desempenho destes sistemas. Secundariamente, contribuem para as poropressões os sistemas de cobertura, provisórias e definitivas, além da evolução da frente de trabalho.

O comportamento da massa de resíduos doméstico é peculiar, principalmente, em função do fator “geração de gases” e suas pressões, como tem demonstrado os registros das instrumentações, através de piezômetros e medidas de deformações em aterros sanitários em geral.

A introdução de poropressões de líquidos e gases nos modelos de análise, pontualmente, por intermédio de linhas piezométricas “equivalentes”, ou a relação entre as poropressões de lixiviados e/ou gases e as tensões verticais produzidas pelo peso de resíduos sobre o ponto, coeficiente r_u , são as formas adequadas para representar o modelo hidrogeotécnico, em função da geometria da massa de resíduos e seus sistemas de drenagem internos.

Deste modo, na análise de estabilidade foi adotado o fator de pressão neutra r_u constante dentro da massa de resíduos, com $r_u = u/\gamma z$, onde u é a poropressão, γ é o peso específico do material e z é a altura de material sobre o ponto considerado, usado por Bishop e Morgenstern (1960). Variou-se o fator r_u , de 0,00 a 0,50, de forma a obter a variação do fator de segurança do maciço para várias condições de poropressões.

O modelo hidrogeotécnico adotado foi apresentado no artigo técnico “Modelo Reológico de Comportamento de Resíduos e Aterros Sanitários” por Benvenuto & Cipriano (2010).

6.5 Resultados obtidos

Com base na geometria das seções adotadas foi possível obter os Fatores de Segurança para o aterro sanitário, considerando a geometria da conformação final e projeto de regularização de base do projeto proposto e o levantamento topográfico fornecido pelo cliente.

Nesse sentido, na Tabela 6-2 a seguir são apresentados os valores de Fatores de Segurança em função do r_u das seções analisadas:

Coeficiente r_u	Fator de Segurança, FS		
	A-A'	B-B'	C-C'
0,0	2,1	2,3	2,0
0,1	2,0	2,1	1,9
0,2	1,8	2,0	1,7
0,3	1,7	1,8	1,5
0,4	1,5	1,6	1,4
0,5	1,3	1,4	1,2

Tabela 6-2: Valores de Fator de Segurança em função do r_u das seções analisadas.

Os resultados apresentados na Tabela 6-2, são representados no gráfico a seguir:

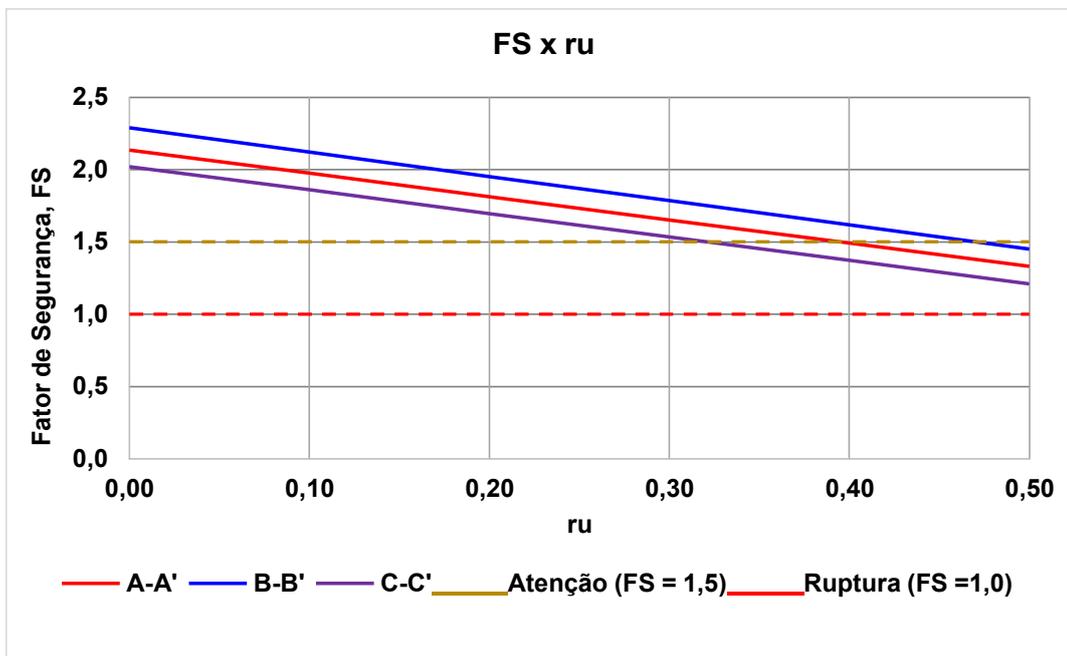


Gráfico 6-1: Fator de Segurança em função do r_u .

A modelagem da estabilidade está em função da variação do parâmetro r_u , com coeficiente de correlação unitário e equações lineares definidas para as seções de estudo. As equações das retas para cada seção são apresentadas na Tabela 6-3, a seguir.

Superfícies de ruptura circulares		Atenção (FS=1,5)	Ruptura (FS=1,0)
Seção A-A'	FS= -1,6071* r_u + 2,1343	0,39	0,71
Secão B-B'	FS= -1,6808* r_u + 2,2894	0,47	0,77
Secão C-C'	FS= -1,6199* r_u + 2,0204	0,32	0,63

Tabela 6-3. Equação da reta das seções analisadas em função do r_u .

A modelagem apresentada para a estabilidade geotécnica dos maciços de resíduos Classe II, em suas seções mais críticas, demonstram que o aterro estará estável se implantado e operado seguindo as especificações de projeto, com Fator de Segurança mínimo de 1,5.

Com relação às ações a serem tomadas em função do valor do Fator de Segurança, tem sido adotada as seguintes ações definidas na Tabela 6-4, em nível de monitoramento geotécnico dos aterros sanitários

Condição	Intervenção
$F.S. \geq 1,5$	Inspeção Técnica Mensal com nova leitura de pressão.
$1,3 \geq F.S. \geq 1,5$	Inspeção Técnica Quinzenal/Semanal com nova leitura de pressão e ações de drenagem.
$1,1 \geq F.S. > 1,3$	Inspeção Técnica Semanal/Diária com nova leitura de pressão e ações de drenagem.
$F.S. < 1,1$	Eventual paralisação imediata dos trabalhos com ações de drenagem e demais medidas corretivas adequadas.

Tabela 6-4. Critérios de ação em função de análise dos valores de Fator de Segurança.

Cabe, no entanto, lembrar que a análise de estabilidade e o monitoramento da segurança estrutural não podem ser analisados apenas pela modelagem matemática, mas sim a partir de um conjunto de fatores conforme descrito em Benvenuto (2011).

Nas figuras a seguir são apresentadas as seções de análise de estabilidade do maciço de resíduos em função de suas fases com coeficientes de r_u de 0,20.

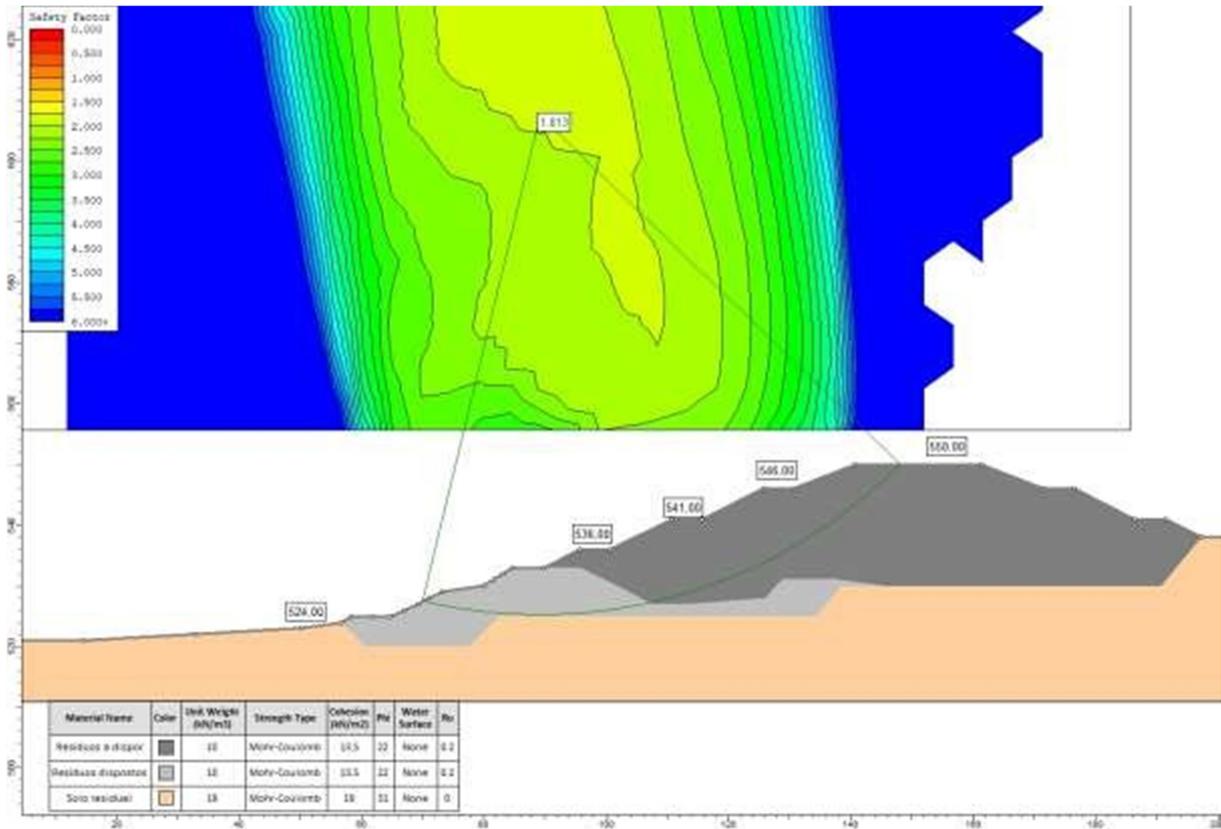


Figura 6-1. Seção de análise de estabilidade A-A' ($r_u = 0,20$; $FS = 1,8$).

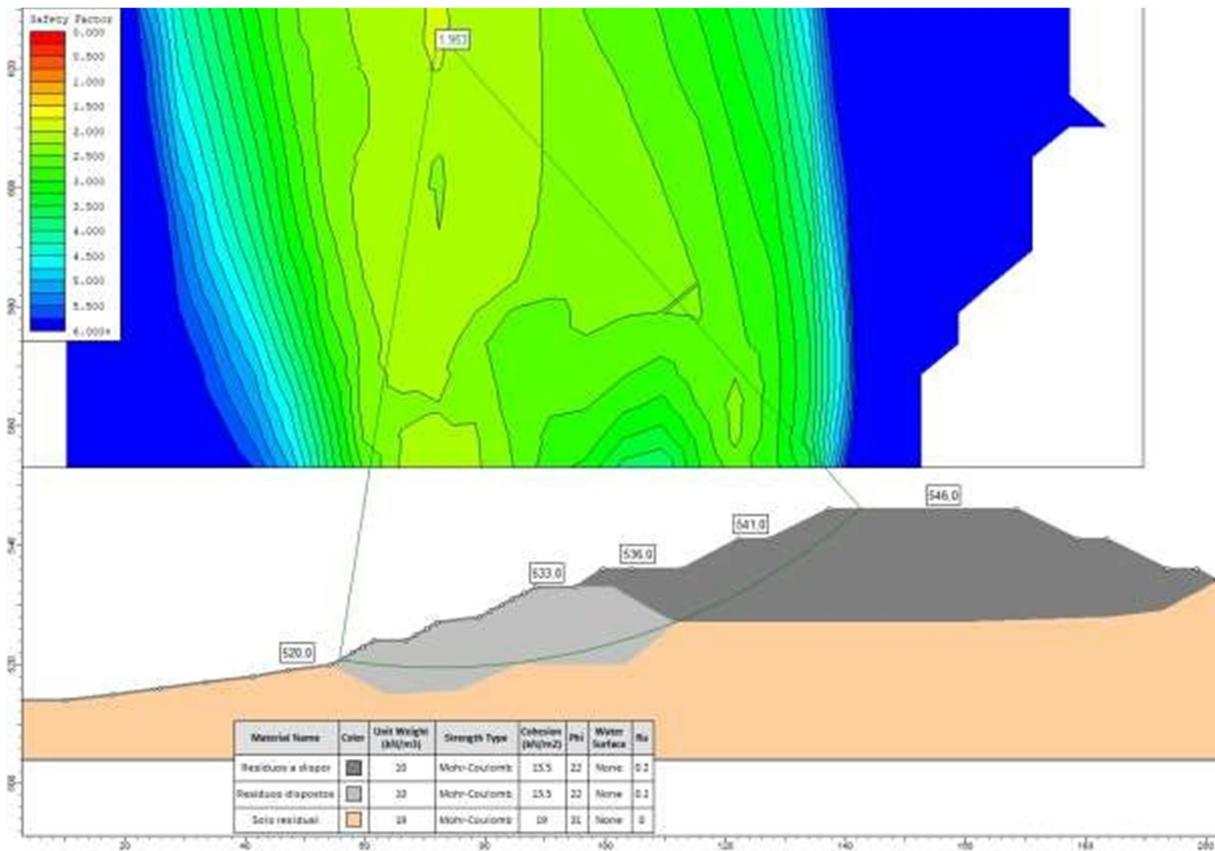


Figura 6-2. Seção de análise de estabilidade B-B' ($r_u = 0,20$; $FS = 2,0$).

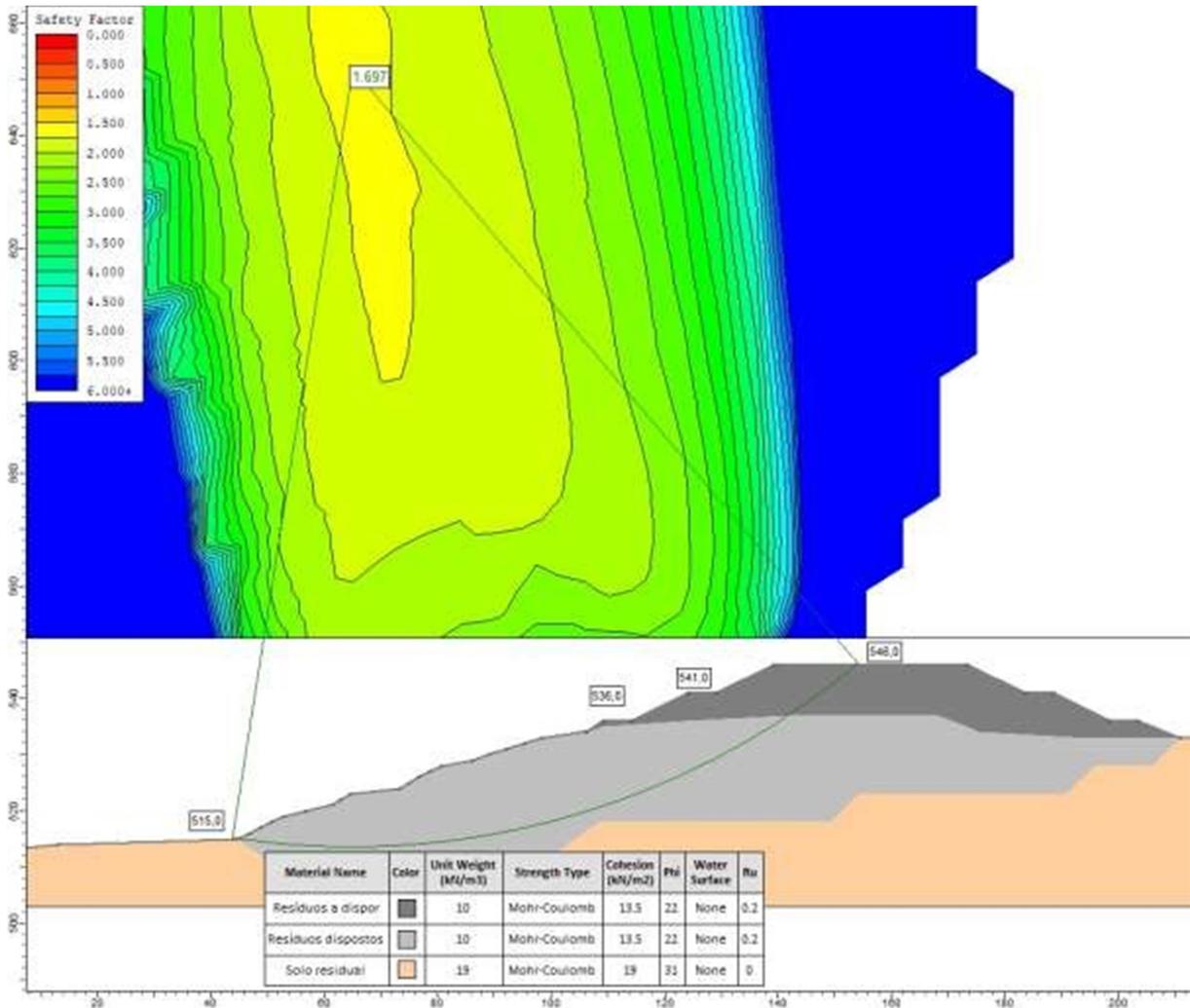


Figura 6-3. Seção de análise de estabilidade C-C' ($r_u = 0,20$; FS = 1,7).

No Anexo I é apresentado o memorial de cálculo de estabilidade no aterro de resíduos.

6.6 Considerações finais

Em aterros deste tipo, quando apresentam condições geotécnicas de fundação adequadas, sistemas de drenagem pluvial e interna bem implantados e boa compactação dos resíduos, se projetado e operado dentro das condições de projeto, apresentam r_u da ordem de 0,20 a 0,30. Tendo isso em vista, conclui-se que os sistemas de drenagens internas a ser implantados, como drenagem de águas pluviais, cobertura final nos taludes e compactação dos resíduos contribuirão efetivamente



para a margem de segurança recomendada de valores de Fator de Segurança $\geq 1,50$, o que é uma evidência de garantia de estabilidade geomecânica.

Recomenda-se a implementação do monitoramento geotécnico com a finalidade de acompanhar o comportamento dos maciços, conforme projetado.

BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LIMPEZA PÚBLICA. Curso anual de treinamento sobre Aterros Sanitários - Licenças/Projeto/Operação. São Paulo: ABLP, 2008 a 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 8.419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 07p.

_____, NBR 10.004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 71p.

_____, NBR 13.896: Aterros de resíduos não perigosos – critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 12p.

_____, NBR 11.682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____, NBR 16.199:2020 – Barreiras geossintéticas – Instalação de geomembranas poliméricas, datado de 25/03/2020.

AZEVEDO NETTO, J.M., FERNANDEZ, M.F., ARAUJO, R. E ITO A.E. Manual de Hidráulica. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1998.

BAGCHI, A. Design Construction and Monitoring of Landfills. 2th edition, John Wiley & Sons, Inc., 1994.

BENVENUTO, C.; CUNHA, M. A. Escorregamento em massa de lixo no Aterro Sanitário Bandeirantes em São Paulo, SP. II Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos - REGEO'91, Rio de Janeiro, Nov. de 1991.

BENVENUTO, C.; CUNHA, M. A. A estabilidade geotécnica de aterros sanitários. Revista Construção, Editora PINI, ano XLV n.º 2314, jun. 1992.

BENVENUTO C. et al. A Metodologia Geotécnica Aplicada à Disposição dos Resíduos Sólidos. In: GEOAMBIENTAL SEMINÁRIO SOBRE GEOTECNIA DE ATERROS

PARA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS - ÊNFASE EM ATERROS SANITÁRIOS, 1994, Rio de Janeiro, RJ. COPPE-UFRJ, 1994.

BENVENUTO C.; CIPRIANO, M. A. Modelo reológico de comportamento de resíduos e aterros sanitários, segundo critérios de projeto e operação atuais no Brasil. Revista Limpeza Pública, São Paulo, Edição 74. Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública – ABLP, 2010.

_____, Monitoramento Geotécnico e a estabilidade dos aterros sanitários. Revista Limpeza Pública, São Paulo, Edição 77. Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública – ABLP, 2011.

BENVENUTO C.; BENVENUTO M. Ensaio mecânicos em resíduos sólidos urbanos: as teorias e as finalidades práticas. Revista Limpeza Pública, São Paulo, Edição 81. Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública – ABLP, 2012.

BENVENUTO, C., MORETTI, M. E BENVENUTO, M. Fluxo de resíduos sólidos domiciliares em aterros sanitários no Brasil e análise de risco em áreas urbanas. Revista Limpeza Pública, Edição 93. Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública – ABLP, 2016.

_____, Instrumentação geotécnica e monitoramento da estabilidade de aterros sanitários. Revista Limpeza Pública, Edição 101. Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública – ABLP, 2019.

BISHOP, A. W; MORGENSTERN, N. (1960) Stability coefficients for Earth Slopes - Geothécniqne - N. 4 - Vol. X.

BRASTUBO. Catálogo técnico PEAD – Tubos de Polietileno. Grupo Brastubo. Disponível em: <<http://www.brastubo.com.br/pead/tubosdepolietileno.pdf>>. Acesso em: 26 jul. 2011.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. Drenagem Urbana: Manual de Projeto. São Paulo: CETESB, 1986.

_____, Resíduos Sólidos Domésticos: Tratamento e Disposição Final. São Paulo: CETESB, 1994.

CRUZ, P. T. E FERREIRA, R. C. Aterros Compactados, em Solos do Interior de São Paulo. São Paulo: ABMS e USP/SC, 1993, 279p.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Guia prático para projetos de pequenas obras hidráulicas. Secretaria de Estado de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento do Estado de São Paulo. São Paulo: DAEE, 2005. 116 p.

DEL GRECCO, O. & OGGERI, C. Geotechnical Parameters of Sanitary Wastes. In: SARDINIA, 1993, Sardinia, Itália. IV International Landfill Symposium.

_____, Shear Resistance Tests on Municipal Solid Wastes. In: First International Congress on Environmental Geotechnics, Edmonton, Canadá, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de drenagem de rodovias. Engesur Consultoria e Estudos Técnicos Ltda. 2 Ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (UNITED STATES). Developing your stormwater pollution revention plan: A guide for construction sites. EPA, Mai de 2007. Disponível em: <www.epa.gov/npdes/pubs/sw_swppp_guide.pdf>. Acesso: fev/18.

GEOTECH GEOTECNIA AMBIENTAL CONSULTORIA E PROJETOS LTDA.
Complementação do Relatório Ambiental Preliminar do Aterro Sanitário do Município de Cerquillo. São Paulo: GEOTECH, 13 set. 1999 (REL. TEC. ERCQ. 02/99).

GEOTECH GEOTECNIA AMBIENTAL CONSULTORIA E PROJETOS LTDA.
Adequações de projeto para implantação do aterro sanitário do município de Cerquillo, SP. São Paulo: GEOTECH, jul. 2001.

GEOTECH GEOTECNIA AMBIENTAL CONSULTORIA E PROJETOS LTDA.
Detalhamento e adequações do projeto para implantação da segunda fase do aterro sanitário do município de Cerquillo, SP. São Paulo: GEOTECH, abr. 2005.

GEOTECH GEOTECNIA AMBIENTAL CONSULTORIA E PROJETOS LTDA. Projeto executivo da terceira fase do aterro sanitário do município de Cerquillo, SP. São Paulo: GEOTECH, mar. 2012.

GRUPO DE PESQUISA EM RECURSOS HÍDRICOS (Viçosa. MG). Canal. Aplicativo. Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa: GPRH, 2000. Disponível em: <<http://www.ufv.br/dea/gprh/software.htm>>. Acesso em: 09 ago. 2010.

_____, Plúvio 2.1.: chuvas intensas para o Brasil. Versão 2.1. Aplicativo. Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa: GPRH, 2006. Disponível em: <www.ufv.br/dea/gprh/software.htm>. Acesso em: 09 ago. 2010.

GUIDICINI, C. E NIEBLE, C.M. Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1976.

KÖLSCH, F. Material Values for Some Mechanical Properties of Domestic Waste. In: SARDINIA, 1995, Sardinia, Itália, 1995. Fifth International Landfill Symposium.

LAMBE, T. W. & WHITMAN, R. V. Soil Mechanics. Massachusetts Institute of Technology. New York, 1969.

PINTO, C. S. *et al.* Propriedades dos Solos Residuais. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DOS SOLOS - NÚCLEO REGIONAL DE SÃO PAULO; DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA DA ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS. Solos do Interior de São Paulo. São Carlos: ABMS & USP/SC, 1993. p. 97-142

SHARMA, H. D. E LEWIS, S. P. Waste Containment System, Waste Stabilization, and Landfills - Design and Evaluation, John Wiley Sons, Inc. pp 534 - 1994.

SPENCER, E. A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-slice Forces. Géotechnique, 17 (1) : 11-26, Mar., 1967.



TOMAZ, P. Curso de manejo de águas pluviais: Parte 1. São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 29 jul. 2010. Material de curso.

VILLELA, S.M. E MATTOS A. Hidrologia Aplicada. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil, 1976.

ZEKKOS, D., KAVAZANJIAN JR, E., BRAY, J.D., MATASOVIC, N., RIEMER, M.F. Physical Characterization of Municipal Solid Waste for Geotechnical Purposes. In Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 136 (9).September 2010.