



PROJETO DE EXECUÇÃO DA EXPANSÃO DA UNIDADE DE CONFINAMENTO DE RESÍDUOS DE BIGORNE.

ATERRO SANITÁRIO DE BIGORNE

Bigorne, Lamego

ANEXO A MEMÓRIA DESCRITIVA

DOCUMENTO - I.2. ANEXO Cálculo de Estabilidade

Projeto de integração, arranjos exteriores e volumes para deposição de resíduos

Memória Descritiva

Anexo nº 2. Cálculo de Estabilidade

372-PDR-PE-A2 MD_R01.DOCX

PROJETO DE EXECUÇÃO

MEMÓRIA DESCRITIVA

Anexo nº 2. Cálculo de Estabilidade

Fevereiro 2022

ATERRO SANITÁRIO DE BIGORNE	1
Bigorne, Lamego	1
1 Introdução	4
2 Objeto	4
3 Formas de instabilidade em aterros.....	6
3.1 Deslizamentos superficiais	6
3.2 Deslizamentos profundos.....	6
4 Estabilidade da massa de resíduos e estruturas associadas	7
4.1 Objetivo.....	7
4.2 Caracterização geotécnica	8
4.3 Secção de cálculo	13
4.4 Método de cálculo	15
4.5 Resultados para la sección transversal de cálculo.....	16
4.6 Conclusões	18
5 Estabilidade do substrato geológico.	19
6 Resistência ao deslizamento entre as camadas de impermeabilização e de drenagem	20
6.1 Descrição das camadas de impermeabilização e drenagem de lixiviados.....	20
6.2 Características geotécnicas	21
6.3 Secção de cálculo	23
6.4 Cálculo de fatores de segurança em camadas de impermeabilização e drenagem	24
6.4.1 Estabilidade ao deslizamento: camada de argila - solo fundo da célula	26
6.4.2 Estabilidade ao deslizamento: geocomposto bentonítico - camada de argila	27
6.4.3 Estabilidade ao deslizamento: geomembrana PEAD - geocomposto bentonítico	28
6.4.4 Estabilidade ao deslizamento: geotêxtil - geomembrana PEAD.....	29
6.4.5 Estabilidade de deslizamento: Camada de drenagem lixiviados - geotêxtil.....	30

6.5	Conclusões	31
7	Resistência ao deslizamento das camadas de selagem.....	32
7.1	Descrição das camadas de selagem	32
7.2	Características geotécnicas	34
7.3	Secção de cálculo	35
7.4	Cálculo de coeficientes de segurança em camadas do sistema de selagem	35
7.4.1	Estabilidade ao deslizamento: Geodreno - Terreno regularizado	37
7.4.2	Estabilidade ao deslizamento: Geomembrana PEAD - Geodreno.....	38
7.4.3	Estabilidade ao deslizamento: Geodreno- Geomembrana PEAD.....	39
7.4.4	Estabilidade ao deslizamento: Solo cobertura - Geodreno.....	40
7.5	Conclusões	41

1 Introdução

A razão fundamental pela qual os estudos de estabilidade de aterros são tão complexos é devido à dificuldade envolvida na descrição dos materiais, e especialmente dos resíduos, que entram em jogo na análise em termos geotécnicos clássicos.

Soma-se a essa dificuldade a discussão sobre qual é o fator de segurança que deve ser considerado adequado para uma obra dessas características.

A heterogeneidade na composição do resíduo, a anisotropia causada pelo seu arranjo em camadas, as alterações físicas sofridas no processo de despejo, espalhamento e compactação, e as alterações físico-químicas que o resíduo muitas vezes experimenta durante os anos após sua deposição, tornam muito complexa a tarefa de atribuir valores geotécnicos únicos, precisos e válidos para a massa de resíduos em aterro.

Este processo é ainda mais difícil se tivermos em conta que apenas podemos prever grosseiramente a natureza dos grandes grupos de resíduos que vão ser depositados na Expansão da Unidade de Confinamento de Resíduos de Bigorne, que é o objecto deste estudo.

2 Objeto

O presente Anexo para o Cálculo da Estabilidade para Expansão da Unidade de Confinamento de Resíduos de Bigorne, é elaborado com o objetivo de verificar se o conjunto formado pelo terreno e o aterro será uma estrutura estável e integral ao longo do tempo, que garantirá a estabilidade da massa de resíduos.

Da mesma forma, os assentamentos previstos, tanto na camada de impermeabilização como no seu posterior fecho, deverão necessariamente ser verificados quanto à sua integridade, impermeabilização e função drenante, principalmente quando o terreno de apoio for muito deformável e no caso de aterro RSU com alto teor orgânico, o que causará assentamentos importantes mesmo após o seu fecho.

Resumidamente, os objetivos deste estudo são os seguintes:

- Estabelecer as hipóteses e mecanismos de ruptura que podem ser desenvolvidos e o fator de segurança a ser aplicado em cada caso, para realizar as devidas análises de estabilidade.
- Sintetizar o modelo de estabilidade do aterro num perfil de cálculo e uma série de solos de distintas características ajustados à realidade do aterro.
- Definir, justificadamente, os parâmetros geotécnicos de cada uma das camadas.
- Efetuar os cálculos de estabilidade do aterro de acordo com as hipóteses de falha estabelecidas e tirar as conclusões derivadas com base nos fatores de segurança definidos.

Com todos os itens acima, calculamos:

- **Estabilidade da massa de resíduos e estruturas associadas, para um nível máximo de 968,00 m, de acordo com os planos de enchimento, que após o fecho da célula atingirá 969,00 m.**
- **Estabilidade do substrato geológico, para evitar assentamentos que possam causar danos à barreira.**
- **Resistência ao deslizamento entre as camadas de impermeabilização e drenagem da unidade de confinamento e entre a camada inferior e o solo no fundo da célula.**
- **Resistência ao deslizamento entre as camadas de fecho da célula.**

As situações de cálculo descritas acima devem ser analisadas para qualquer superfície de deslizamento que possa ser considerada em todo a célula. Os cálculos de estabilidade devem ser realizados para as seguintes posições da superfície de deslizamento:

- Superfícies de deslizamento que incluem a massa de resíduos, o terreno de apoio natural e o aterro de fecho.
- Superfícies de deslizamento que ocorrem no interior da massa de resíduos do aterro.
- Superfícies de deslizamento que se desenvolvem através do sistema de impermeabilização.

A Figura 1 mostra exemplos dessas três tipologias de superfície de deslizamento que devem ser consideradas nas análises:

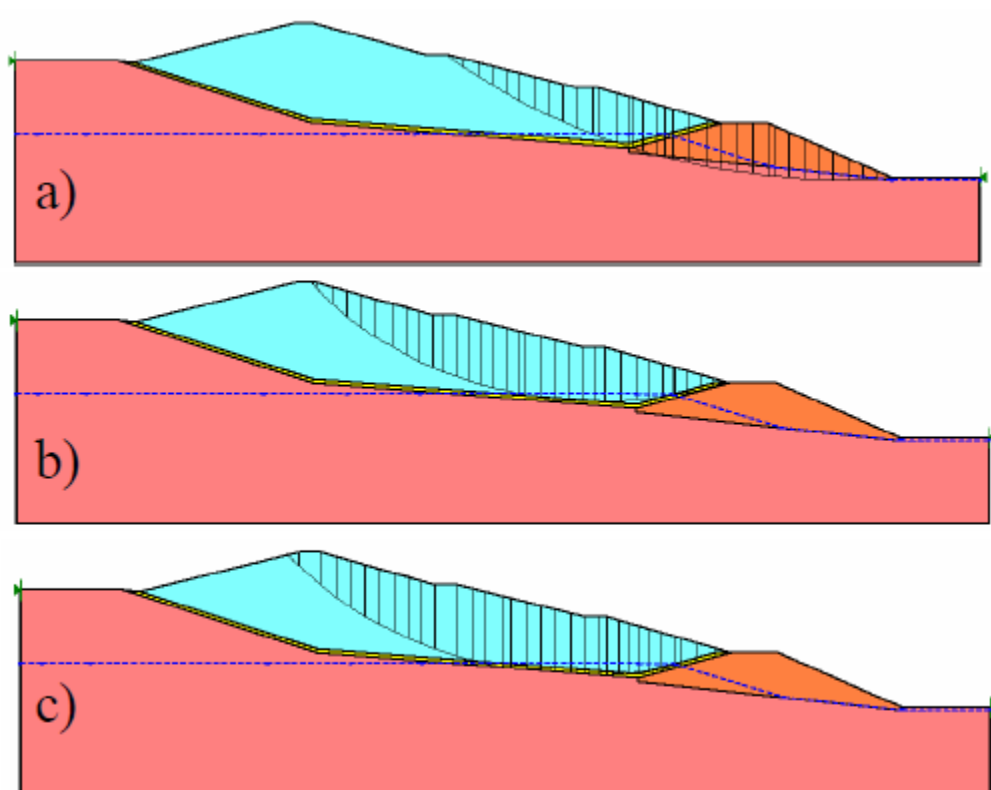


Figura 1 - Superfícies de deslizamento a serem consideradas nos cálculos:

- a) entre o aterro e o terreno de apoio natural;*
- b) dentro da massa de resíduos do aterro;*
- c) através do pacote de impermeabilização*

3 Formas de instabilidade em aterros

Em geral, observam-se duas formas de instabilidade nos taludes dos aterros, tipologias que foram estudadas detalhadamente para o caso particular da Expansão da Unidade de Confinamento de Resíduos de Bigorne.

3.1 Deslizamentos superficiais

São deslizamentos de geometria circular, intersetados na crista do aterro de fecho e pouco extensos em profundidade, que afetam exclusivamente o material de cobertura.

Eles não são problemáticos do ponto de vista da estabilidade global do aterro, pois não atingem grandes massas de material e não costumam atingir os resíduos aterrados. No entanto, são deslizamentos que **afetam a cobertura de selagem** e causam uma **deterioração estética e funcional** dos sistemas de drenagem e impermeabilização do aterro.

3.2 Deslizamentos profundos

São aqueles que atingem grandes massas de material, com superfícies de ruptura que penetram nos resíduos e podem até mesmo passar pela fundação do aterro.

Esse tipo de instabilidade é o que realmente preocupa, pois, os deslizamentos superficiais nunca causarão situações de sério risco material, pessoal ou ambiental.

O início mais característico de um movimento desse tipo começa com a formação de uma protuberância no pé do talude, razão pela qual às vezes se confunde entre o início incipiente de um fenômeno de instabilidade e o de um rearranjo do material por fluência plástica.

Na prática, a distinção entre um ou outro fenômeno é verificada instrumentalizando e monitorizando a frente e medindo a aceleração dos movimentos (medidas topográficas frequentes da superfície do terreno e inclinações métricas).

As causas que podem causar um deslizamento do tipo profundo são várias, das quais se destacam:

- Aumento das pressões intersticiais devido à falta de drenagem.
- Projeto ou execução de taludes excessivamente verticais.
- Escavações ao pé do aterro.
- Sobrecargas no topo da célula de descarga.
- Fenômenos desestabilizadores externos (detonação, modificações antrópicas), ou internos (reações físico-químicas, biogás).

4 Estabilidade da massa de resíduos e estruturas associadas

4.1 Objetivo

O objetivo deste estudo é avaliar a estabilidade dos taludes que os resíduos apresentarão uma vez perfilados e ajustados à morfologia final definida neste projeto, com o nível máximo estabelecido em 968,00 m, que após o fecho será de 969,00 m.

Conforme indicado no Projeto de Execução da Expansão da Unidade de Confinamento de Resíduos de Bigorne, foi formada uma célula de confinamento através da construção de um aterro externo com inclinação de 2H:1V que delimita as laterais da célula e o nivelamento do fundo, inclinado em direção ao poço de extração, que tem a dupla função de obter uma superfície de apoio substancialmente horizontal que garante a estabilidade do aterro contra deslizamentos e dar ao fundo da célula inclinações de drenagem que facilitam a circulação do lixiviado no fundo da célula em direção à rede de drenos e através destes para o poço de captação e extração.

Por esta razão, uma inclinação mínima de 2% foi definida como parâmetro de projeto tanto nos planos de fundo quanto nos drenos do canal. Da mesma forma, é fixada uma inclinação máxima de 10% no fundo e 50% nas laterais da bacia, por motivos construtivos, para a colocação e estabilidade das barreiras de impermeabilização geológica e artificial e da camada de drenagem de lixiviados.

Trata-se de utilizar a morfologia natural do terreno e orientação da célula de modo que as elevações sejam utilizadas para construir as bermas e os vales para acomodar os drenos, definindo áreas em que com o mínimo de terraplenagem se consegue uma capacidade de descarga suficiente.

O enchimento começa com a colocação de resíduos no fundo da célula, espalhando e compactando em camadas sucessivas até atingir a cota do aterro de fecho. A cada quatro alturas de camada de 2,50 m será executada uma berma intermédia para que o depósito seja soterrado por taludes de 2H:1V.

Conforme indicado no no Projeto de Execução da Expansão da Unidade de Confinamento de Resíduos de Bigorne, o perfil será regulado para que os resíduos apresentem **taludes com inclinação de 2H:1V e altura de 10 m**. Entre os quais serão instaladas **bermas de 6,00 m de largura**.

Isto resulta numa **inclinação geral ou envolvente de 2,60 H: 1V**.

A figura que se segue mostra a disposição final do que foi explicado nos parágrafos anteriores.

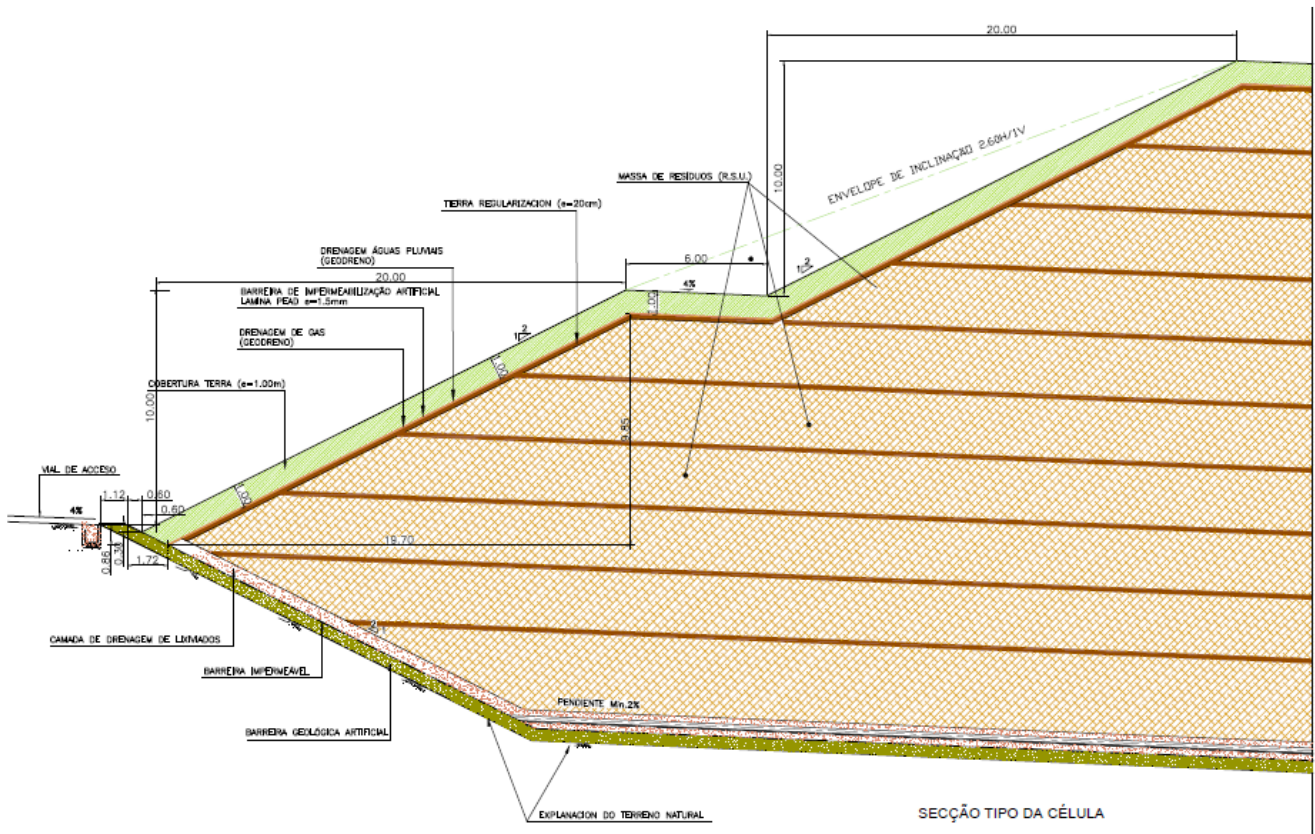


Figura 2 - Seção típica do modelo de preenchimento de célula

Para realizar a análise de estabilidade, foi analisada a topografia final da obra executada para determinar a geometria dos taludes a fim de identificar os trechos mais desfavoráveis.

Uma vez identificada a **seção mais desfavorável**, que, tal como os restantes parâmetros geométricos, acaba por ser **a de maior altura do dique**.

Foi realizada uma análise **dos parâmetros geomecânicos** dos materiais que compõem o aterro.

A seção tipo estudada é a mais desfavorável. Coincide com a maior diferença de elevação entre os pontos de altura máxima de enchimento ou corte, e altura máxima de enchimento e em que a distância em projeção horizontal entre ambos os pontos é menor. Portanto, se o trecho estudado atende aos critérios de estabilidade estabelecidos, podemos concluir a viabilidade do restante dos taludes em alturas inferiores à estudada.

A rotura do maciço rochoso que compões a fundação do aterro em construção é descartada e, portanto, não estudada. Ao apoiar o aterro, formado pela extensão e compactação dos resíduos, sobre um substrato rochoso com resistência muito superior à dos resíduos, todas as superfícies de rotura foram traçadas sobre os resíduos e foram atribuídas as propriedades geomecânicas destes.

4.2 Caracterização geotécnica

As características dos materiais que compõem o troço foram estimadas a partir de trabalhos de campo, uma vez realizados os principais trabalhos de terraplenagem, e os diferentes estudos que se discutem a seguir:

- **Material base**

A área de implantação da atual Unidade de Confinamento, e de acordo com os estudos geotécnicos efetuados à data da sua execução (que incluem área existente e área de expansão), litologicamente, na área afloram granitos porfiróides de grão médio a grosseiro de duas micas com entradas de granitos de grão fino, biotítico. Ocorrem também filões aplíticos e pegmatíticos com orientação preferencial N-S.

A célula é escavada em rocha, portanto os parâmetros mecânicos a serem considerados são aqueles correspondentes a essa rocha, portanto sua classificação será feita através do índice de qualidade RMR.

A CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR desenvolvida por Bieniawski, (1989) constitui um sistema de classificação de maciços rochosos que permite, por sua vez, relacionar os índices de qualidade com os parâmetros de projeto e suporte de uma escavação. O parâmetro que define a classificação é o chamado índice RMR (ROCK MASS RATING), que indica a qualidade do maciço rochoso em cada domínio estrutural com base nos seguintes parâmetros:

- 1.-Resistência à compressão simples da matriz rochosa.
- 2.-R.Q.D. Grau de fratura do maciço rochoso.
- 3.-Espaçamento entre descontinuidades.
- 4.-Condições das descontinuidades, que consiste em considerar os seguintes parâmetros:
 - Abertura das faces da descontinuidade.
 - Continuidade ou persistência da descontinuidade.
 - Rugosidade.
 - Alteração da descontinuidade.
 - Preenchimento de descontinuidades.
- 5.-Presença de Água, num maciço rochoso, a água tem uma grande influência no seu comportamento, a descrição utilizada para este critério é: completamente seco, húmido, água com pressão moderada e água com elevada pressão.

6.-Orientação das descontinuidades

Para obter o Índice Bieniawski RMR, é feito o seguinte:

1. -As 5 variáveis ou parâmetros calculados são somados, resultando num valor de índice (RMR básico).
- 2.-O parâmetro 6 que se refere à orientação das descontinuidades em relação à escavação.
- 3.-O valor obtido com o parâmetro 6 será subtraído do RMR básico e será obtido o valor RMR, que varia entre 0 e 100.

Dependendo do valor obtido, estima-se a qualidade do maciço em estudo e os seus parâmetros de resistência, conforme tabela anexa.

Qualidade do maciço rocha em relação ao Índice RMR

CLASE	CALIDAD	VALORACIÓN RMR	COHESIÓN	ÁNGULO DE ROZAMIENTO
I	Muy buena	100-81	>4 Kg/cm ²	> 45°
II	Buena	80-61	3 - 4 Kg/cm ²	35° - 45°
III	Media	60-41	2 - 3 Kg/cm ²	25° - 35°
IV	Mala	40-21	1 - 2 Kg/cm ²	15°- 25°
V	Muy mala	< 20	< 1 Kg/cm ²	<15°

Podemos classificar o maciço rochoso como classe III, ou seja, qualidade média. Para ficar do lado da segurança, tomaremos os valores médios de coesão e ângulo de atrito correspondentes a essa classificação.

Os parâmetros de resistência que serão tomados na zona do projeto de construção da bacia e da barragem, são os indicados abaixo:

Peso específico = $\gamma = 21,00 \text{ kN/m}^3$

Coesão = $c = 25 \text{ kN/m}^2$

Ângulo de atrito interno = $\Phi = 30^\circ$

- **Resíduos sólidos urbanos**

A densidade dos resíduos depositados desde o ano 2001 até à data, ascende a aproximadamente 1,5 ton/m³. Os fatores que levaram a esta elevada densidade estão amplamente apresentados e justificados no documento respeitante ao estudo de engenharia anteriormente submetido na Plataforma LUA, aquando do seu licenciamento.

No entanto, tendo em consideração a densidade “normal” de referência noutros aterros da empresa com características semelhante e forma de exploração equivalente, parece ser mais adequado considerar que os resíduos a depositar na zona da expansão venham a ter uma densidade de 1,20 ton/m³.

Quanto à sua resistência, parece que, apesar de alguns inconvenientes teóricos, a resistência do resíduo pode ser assimilada ao critério de Mohr-Coulomb, típico dos solos, o qual pode ser descrito por uma coesão e um ângulo de atrito (Sánchez Alciturri, 1997). , Koning et ai. 1997). No entanto, os valores de coesão e ângulo de atrito parecem depender da deformação permitida ao resíduo. Com base em várias retroanálises e estudos de laboratório, Sanchez (1997) recomenda o uso de um ângulo de atrito entre 16° e 26° e uma coesão entre 5 e 25 Kpa. Estes valores são ligeiramente inferiores aos recomendados por outros autores (Koning et al., 1997 ou Walter, 1992), embora pareçam advir de uma análise mais rigorosa, centrada no projeto do aterro (ver figura).

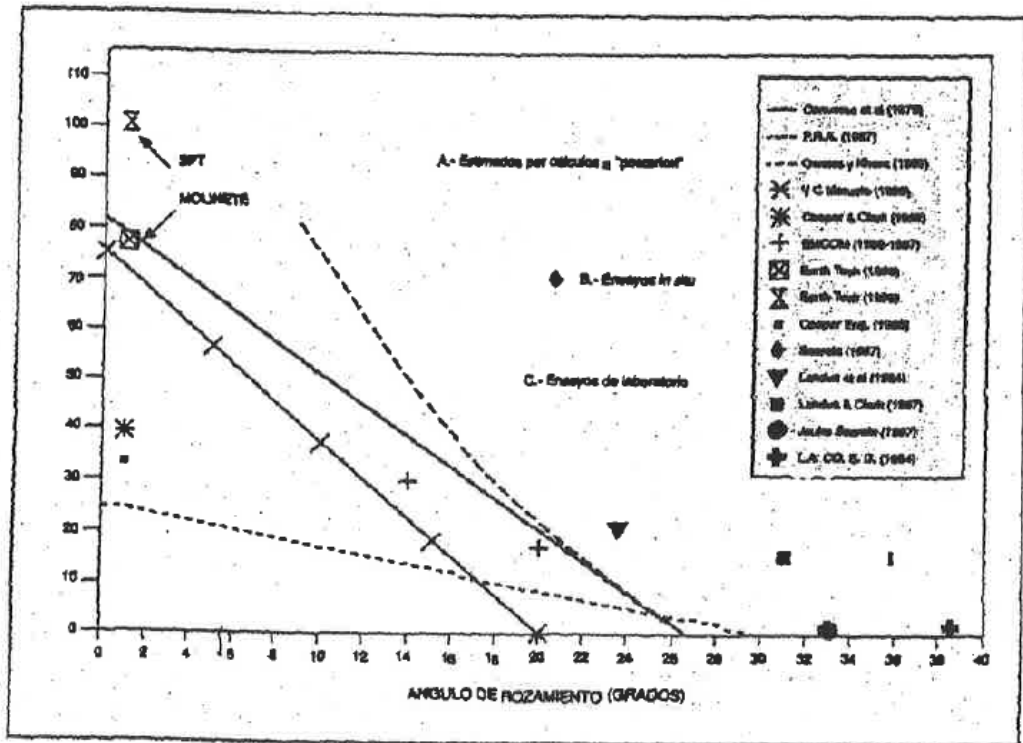


Figura 3 - Determinação de parâmetros resistentes em aterros controlados (Sánchez-Alciturri, 1997)

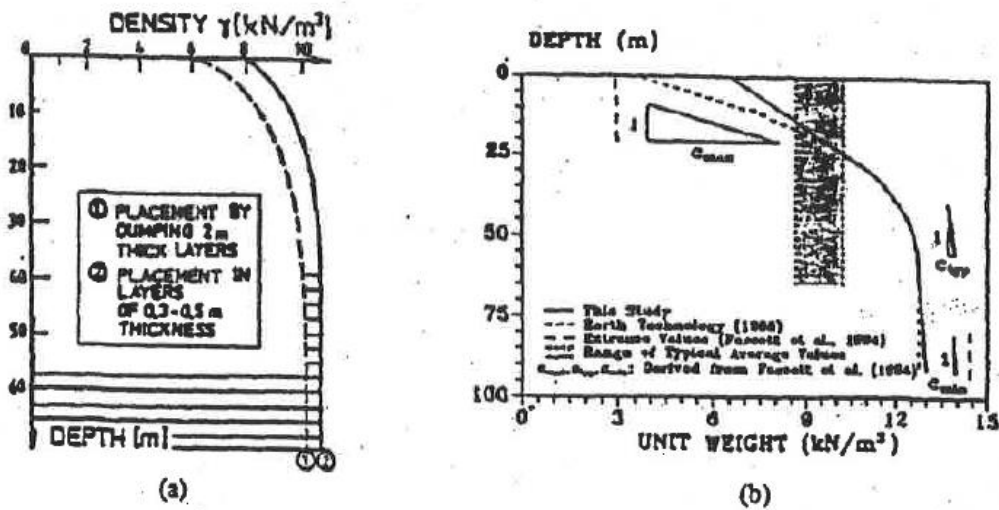


Figura 4 - Perfis de densidade de RSU, a) Koning, 1997, b) Kvazanjian, 1995

A experiência em aterros, onde o lixo bruto é despejado sem compactação, mostram que inclinações na ordem de 2H:1V são perfeitamente estáveis, o que significaria uma resistência ao corte cujo valor mínimo seria:

$$\text{Tag}\Phi = V/H = 1/2 ; \Phi = 26,5^\circ$$

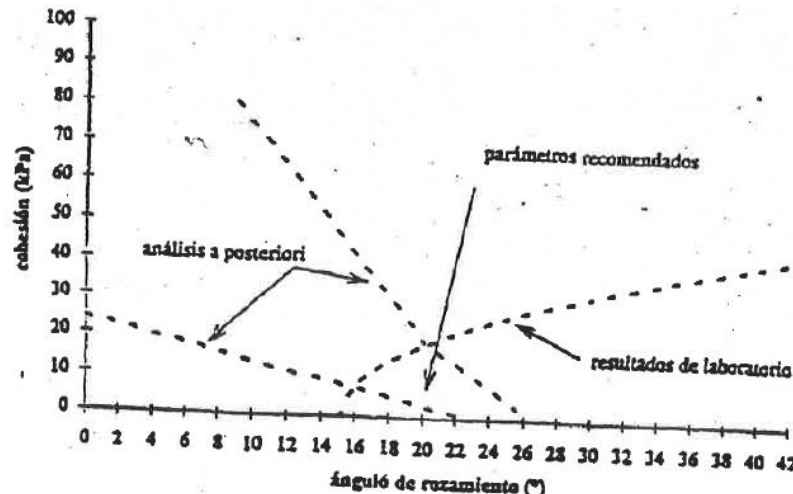


Figura 5 - Parâmetros recomendados para o dimensionamento de taludes em aterros (Sánchez-Alciturri, 1997)

Ao analisar a totalidade do aterro, na sua situação mais desfavorável, uma vez cheio, o perfil de densidade dos resíduos irá variar com a profundidade. Tendo sofrido maior tempo de consolidação, os resíduos inferiores apresentarão uma densidade maior do que as camadas superiores. Portanto, os seguintes valores foram adotados para o cálculo, do ponto de vista conservativo, ficando assim uma análise do lado da segurança:

$$\text{Peso específico} = \gamma = 12 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{Coesão} = c = 7 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Ângulo de atrito interno} = \Phi = 23^\circ$$

No que diz respeito à poropressão, para verificar a sensibilidade da estabilidade do talude no caso de presença de água, assume-se que os resíduos – apesar da existência de extração de lixiviados, que é realizada no interior do aterro – podem encontrar-se saturados. Isto pode afetar apenas a parte inferior do aterro de resíduos, pois o sistema de impermeabilização impede o contato com o terreno natural ou aterro de fecho.

- **Material dos aterros de fecho**

O material a utilizar na construção dos aterros de fecho, será fruto de escavação. O referido material será colocado no local por meio de camadas não superiores a 30 cm, e compactado a 95% do Proctor Modificado de referência usando um cilindro compactador e rega adequados.

Assumindo valores característicos de um aterro formado pelos solos naturalmente presentes, que serão os materiais fruto da escavação, com base na experiência em controlo de terraplanagem e estruturas semelhantes, têm-se:

$$\text{Peso específico} = \gamma = 21 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{Coesão} = c = 20 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Ângulo de atrito interno} = \Phi = 35^\circ$$

Em resumo, os valores adotados para o cálculo são:

MATERIAL	Peso Específico γ [kN/m ³]	Ângulo de atrito interno Φ [graus]	Coesão [kN/m ²]
Material base	21	30	25
Aterros de fecho	21	35	20
R.S.U. Depositados	12	23	7

4.3 Secção de cálculo

A estabilidade da frente da célula de aterro será analisada numa situação de preenchimento até ao nível máximo e numa situação em que o aterro é preenchido e selado, sendo o nível máximo após o fecho de 969,00 m.

A secção sobre a qual versará este estudo de estabilidade será a correspondente a um perfil que corta perpendicularmente à frente do talude da unidade de confinamento, definida pelos pontos:

Coordenadas	X	Y	Z
Punto en base 1	21750,3255	148476,8598	929,00
Punto en coronación 2	21703,1612	148598,8386	968,20
Punto en base 3	21674,1222	148674,1271	957,00

A secção tipo estudada é a mais desfavorável. Coincide com a maior diferença de cota entre os pontos de altura máxima de enchimento e altura mínima na base e com a menor distância de projecção horizontal entre estes dois pontos. Portanto, se a secção em estudo atender aos critérios de estabilidade estabelecidos, podemos concluir a viabilidade dos restantes taludes, que apresentam alturas inferiores à estudada.

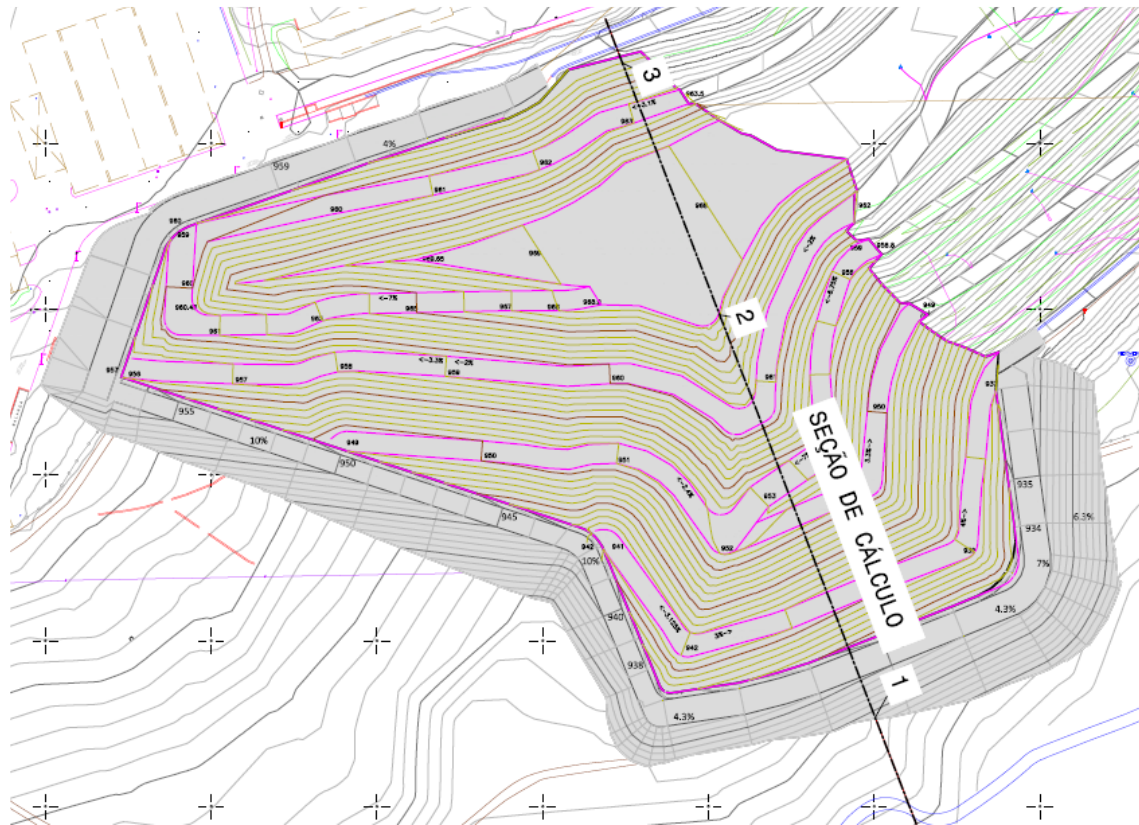


Figura 6 - Planta modelo de preenchimento célula. Secção de cálculo.

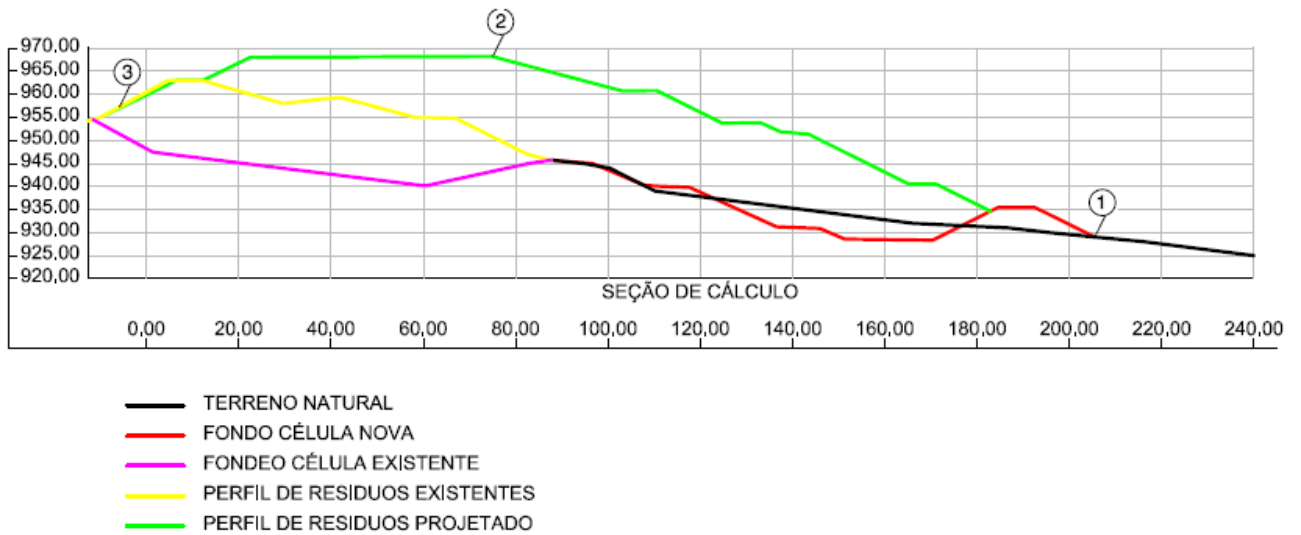


Figura 7 - Perfil transversal modelo de preenchimento da célula. Secção de cálculo.

4.4 Método de cálculo

Uma vez estabelecidos os parâmetros geométricos e geotécnicos, **procedeu-se à análise de estabilidade, utilizando o Método Bishop**, que considera as seguintes hipóteses:

- Superfície de rotura circular.
- Análise bidimensional, correspondente a um estado de deformação plana.
- Lei de resistência de Mohr-Coulomb.
- A resistência ao corte é totalmente mobilizada em todos os pontos da superfície de rotura ao mesmo tempo.
- A análise foi realizada em condições perfeitamente drenadas (nível freático abaixo do corpo do aterro).

Uma superfície de rotura circular é assumida e o coeficiente de segurança correspondente a uma determinada linha de ruptura **é calculado estabelecendo a relação** dos momentos existentes (em relação ao centro do círculo de deslizamento), entre os **momentos instabilizadores e de estabilização**.

O referido estudo foi realizado utilizando a aplicação informática SLIDE 5.0, software de análise de estabilidade de taludes que fornece o factor de segurança mais baixo do aterro em análise, ou seja, o factor de segurança da rotura menos estável e, portanto, da rotura mais provável, utilizando o já apresentado método de Bishop para o caso em questão.

Ao estabelecer as condições de equilíbrio limite, o SLIDE oferece a possibilidade de modelar diferentes tipos de solos e materiais, utilizando parâmetros de entrada determinísticos ou probabilísticos.

O programa realiza o cálculo por meio de análise probabilística, permitindo que por distribuições estatísticas sejam atribuídas a quase todos os parâmetros de entrada, incluindo propriedades do material, cargas e lençol freático. A probabilidade de falha é calculada e fornece uma medida objetiva do risco de falha associado à inclinação do projeto. A sensibilidade da análise permite determinar o efeito de variáveis individuais no fator de segurança do talude.

4.5 Resultados para la sección transversal de cálculo

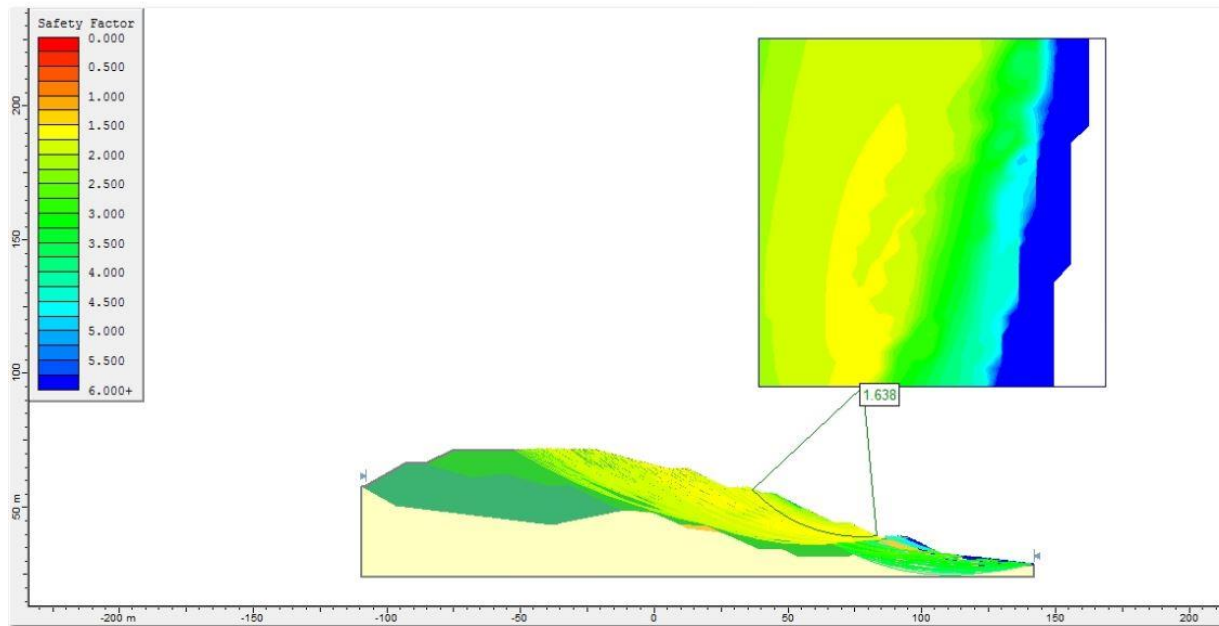


Figura 8 - Gráficos de círculos de rotura e coeficientes de segurança na seção transversal.

Slide Analysis Information

Document Name

File Name: Projeto de execução da Expansão da Unidade de Confinamento de Resíduos de Bigorne

Project Settings

Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program
 Failure Direction: Left to Right
 Units of Measurement: SI Units
 Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m³
 Groundwater Method: Water Surfaces
 Data Output: Standard
 Calculate Excess Pore Pressure: Off
 Allow Ru with Water Surfaces or Grids: Off
 Random Numbers: Pseudo-random Seed
 Random Number Seed: 10116
 Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

Analysis Methods

Analysis Methods used:
 Bishop simplified
 Janbu simplified

Number of slices: 25
 Tolerance: 0.005
 Maximum number of iterations: 50

Surface Options

Surface Type: Circular
Radius increment: 10
Minimum Elevation: Not Defined
Composite Surfaces: Disabled
Reverse Curvature: Create Tension Crack

Material Properties

Material: TERRENO BASE

Strength Type: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 21 kN/m³
Cohesion: 25 kPa
Friction Angle: 30 degrees
Water Surface: None

Material: RSU-EXISTENTE

Strength Type: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 12 kN/m³
Cohesion: 7 kPa
Friction Angle: 23 degrees
Water Surface: None

Material: RSU PROJETADO

Strength Type: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 12 kN/m³
Cohesion: 7 kPa
Friction Angle: 23 degrees
Water Surface: None

Material: DIQUE

Strength Type: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 21 kN/m³
Cohesion: 20 kPa
Friction Angle: 35 degrees
Water Surface: None

Global Minimums

Method: bishop simplified

FS: 1.637830
Center: 77.857, 95.075
Radius: 56.676
Left Slip Surface Endpoint: 36.518, 56.304
Right Slip Surface Endpoint: 83.068, 38.639
Resisting Moment=78428.4 kN-m
Driving Moment=47885.6 kN-m

Method: janbu simplified

FS: 1.569630
Center: 77.857, 95.075
Radius: 56.676
Left Slip Surface Endpoint: 36.518, 56.304
Right Slip Surface Endpoint: 83.068, 38.639
Resisting Horizontal Force=1261.67 kN
Driving Horizontal Force=803.798 kN

4.6 Conclusões

Consideraram-se situações de baixo risco aquelas em que uma potencial instabilidade causaria exclusivamente danos materiais sem consequências ambientais significativas ou para a segurança das pessoas.

Assim, no caso em estudo, estaríamos perante um Aterro de Resíduos Não Perigosos com baixo risco, pelo que o coeficiente de segurança mínimo é de 1,40.

HIPÓTESES	Fator de Segurança mínimo encontrado (FS)	FS mínimo
Aterro de Fecho	> 1,638	1,4
Massa de Resíduos	1,638	1,4

Como pode ser observado no gráfico, o círculo de rotura na situação mais desfavorável do conjunto Resíduo-Aterro, o fator de segurança mínimo obtido é de 1,638.

O referido círculo de rotura não passa pelo aterro de fecho, atravessando apenas a massa de resíduos a ser depositada na nova célula projetada.

Tendo obtido um fator de segurança de 1,638, superior ao fator de segurança mínimo previamente estabelecido, para todas as hipóteses estudadas, podemos dizer que a **Expansão da Unidade de Confinamento de Resíduos de Bigorne é estável contra deslizamentos.**

Como se pode observar no gráfico, a superfície de rotura da situação mais desfavorável do conjunto Resíduos-Aterro tem um fator de segurança de 1,638.

5 Estabilidade do substrato geológico.

O aterro está localizado de forma a evitar a contaminação do solo, águas subterrâneas ou superficiais e garantir a eficiente extração de lixiviado para tratamento.

A proteção do solo e das águas subterrâneas é conseguida pela baixa permeabilidade do terreno natural e pela combinação de uma barreira geológica artificial e um revestimento de impermeabilização artificial.

Neste ponto vamos estudar a estabilidade do substrato geológico, para evitar assentamentos que possam causar danos à barreira aquando do sucessivo enchimento da célula.

No ponto anterior "Estabilidade da massa de resíduos e estruturas associadas", avaliou-se a estabilidade dos taludes que os resíduos apresentariam uma vez perfilados e ajustados à morfologia final definida neste projeto, com o nível máximo de crista estabelecido em 969,00m.

Como pode ser visto na Fig. 8: "Gráficos do círculo de rotura e coeficientes de segurança na seção transversal", o círculo de ruptura na situação mais desfavorável do conjunto Resíduos-Aterro, o fator de segurança obtido é de 1,638, concluindo-se, pois, que a Expansão da Unidade de Confinamento de Resíduos de Bigorne é estável relativamente a deslizamentos. Como se pode ver, esta superfície de rotura circular não atinge o substrato rochoso em nenhum ponto, o que, como indicado anteriormente, indicaria que, **um possível deslizamento não afetaria a barreira de impermeabilização.**

Por outro lado, estudar os assentamentos que ocorreriam no substrato rochoso uma vez concluído o enchimento da célula até o seu nível máximo, e considerando o facto de o substrato sobre o qual repousa o aterro é terreno natural, que se apresenta homogéneo e sem discontinuidades, **por outro lado, os resíduos nele depositados serão distribuídos uniformemente e em nenhum caso haverá carga específica que possa produzir assentamentos diferenciados, o que poderia danificar a barreira.**

6 Resistência ao deslizamento entre as camadas de impermeabilização e de drenagem

6.1 Descrição das camadas de impermeabilização e drenagem de lixiviados

A Expansão da Unidade de Confinamento de Resíduos de Bigorne está localizada e projetada para evitar a contaminação do solo, águas subterrâneas ou superficiais e garantir a recolha eficiente de lixiviados para tratamento.

A proposta de impermeabilização da Unidade de Confinamento está projetada conforme descrito abaixo (nesta ordem do interior para o exterior):

- **Barreira geológica artificial**

Está prevista a construção de uma barreira geológica artificial subjacente a toda a área do aterro, que abrange a sua base e os taludes de confinamento do aterro, constituída por uma camada mineral natural acompanhada de um geossintético bentonítico, que juntos cumprem os requisitos de permeabilidade (coeficiente de permeabilidade $K < 1 \times 10^{-9}$ m/s) e de espessura (*não inferior a 0,5 m*) exigidos.

- **Barreira de impermeabilização artificial**

Foi projetado um revestimento impermeável artificial abaixo da massa de resíduos, instalado sobre a barreira geológica artificial em toda a área do aterro, que abrange a base e os taludes de confinamento do aterro, composta por:

- Geomembrana de impermeabilização em PEAD (polietileno de alta densidade) de 2,00 mm de espessura.
- Geotêxtil de fibra longa de 600 gr/m².

- **Camada de drenagem de lixiviados**

Está prevista um sistema de drenagem e recolha de lixiviados abaixo da massa de resíduos, instalado sobre o revestimento impermeável artificial, em toda a área do aterro, que abrange a base e os taludes de confinamento do aterro, constituída por uma camada de cascalho 20-40 mm (não calcário) de 0,50 m de espessura.

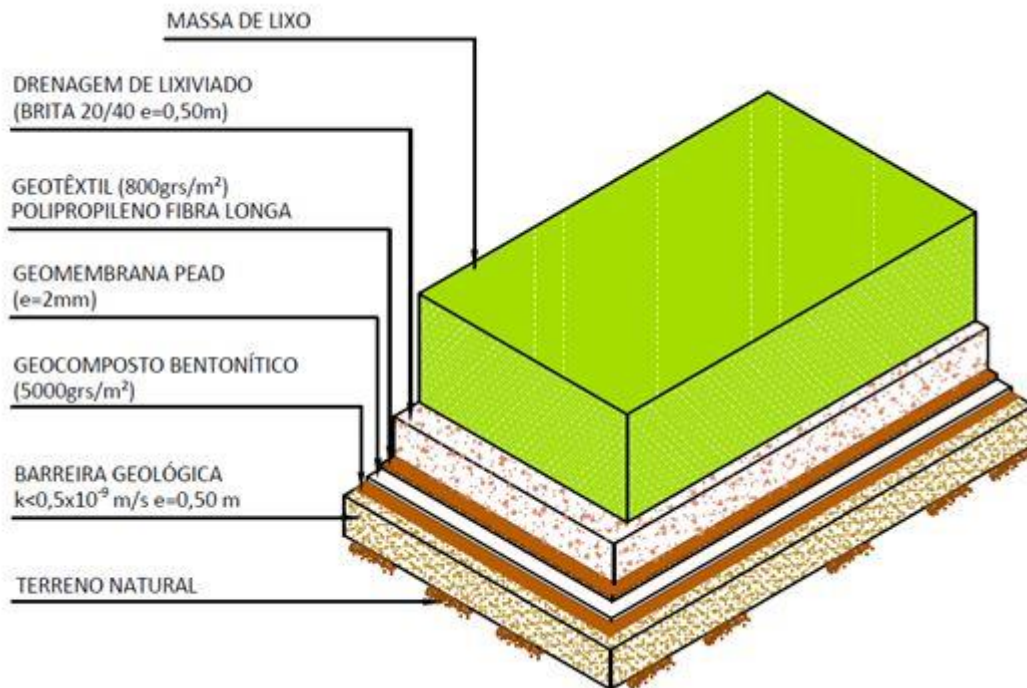


Figura 9 - Esquema impermeabilização do fundo e laterais da célula

6.2 Características geotécnicas

Os coeficientes de atrito entre as diferentes camadas que formam o sistema de impermeabilização e drenagem de lixiviados podem ser obtidos na tabela a seguir:

Ângulo de rozamiento f	Arcilla	Arena	Grava	Geotextil Agujado	Geotextil Termosoldado	PEAD Rugoso	PEAD liso	Geocompuesto impermeable	Resíduos
Arcilla	18								
Arena	22	26							
Grava	24	30	35						
Geotextil agujado	28	28	27	20					
Geotextil termosoldado	23	21	21	20	17				
PEAD rugoso	21	24	35	27	21	30			
PEAD liso	15	18	18	9	8	24	15		
Geocompuesto Impermeable	30	30	28	22	20	30	16	25	
Resíduos	30	30	32	25	19	30	12	25	35

Tabla 2 de la Norma UNE 104425:2001

No caso do aterro em estudo, os coeficientes de atrito entre as diferentes camadas seriam:

	ÂNGULO DE ATRITO
Terreno-Argila	28
Argila – Geocomposto de Impermeabilização	30
Geocomposto de Impermeabilização – PEAD texturizado	30
PEAD texturizado – Geotêxtil agulhado	27
Geotêxtil agulhado - Brita	27
Brita - Resíduos	32

As camadas de impermeabilização da Unidade de Confinamento, com base na regularização do terreno, são as seguintes:

	PESO
Argila	1900 Kg/ m3
Geocomposto bentonítico	5,00 Kg/m ²
PEAD texturizado 2,00 mm	1,88 Kg/m ²
Geotêxtil agulhado	0,500 Kg/m ²
Brita	1450 Kg/m ³
Resíduos	1200 Kg/m ³

6.3 Secção de cálculo

A Unidade de Confinamento é formada pela construção de um aterro externo com inclinação de 2H:1V, equivalente a um ângulo de 26,6°, que delimita as laterais da célula e o nivelamento do fundo, com inclinação em direção ao poço de extração de lixiviado.

Tem a dupla função de conseguir uma superfície de apoio substancialmente horizontal que garante estabilidade ao deslizamento do aterro e confere ao fundo da bacia taludes de drenagem que facilitam a circulação de lixiviados no fundo da célula em direção aos drenos de canalização e, portanto, à captação e extração do mesmo.

Por esta razão, uma inclinação mínima de 2% foi definida como parâmetro de projeto tanto nos planos de fundo quanto nos drenos do canal. Da mesma forma, é fixada uma inclinação máxima de 10% no fundo e 50% nas laterais da bacia, por motivos construtivos, para a colocação e estabilidade das barreiras, impermeabilização geológica e artificial e camada de drenagem de lixiviados.

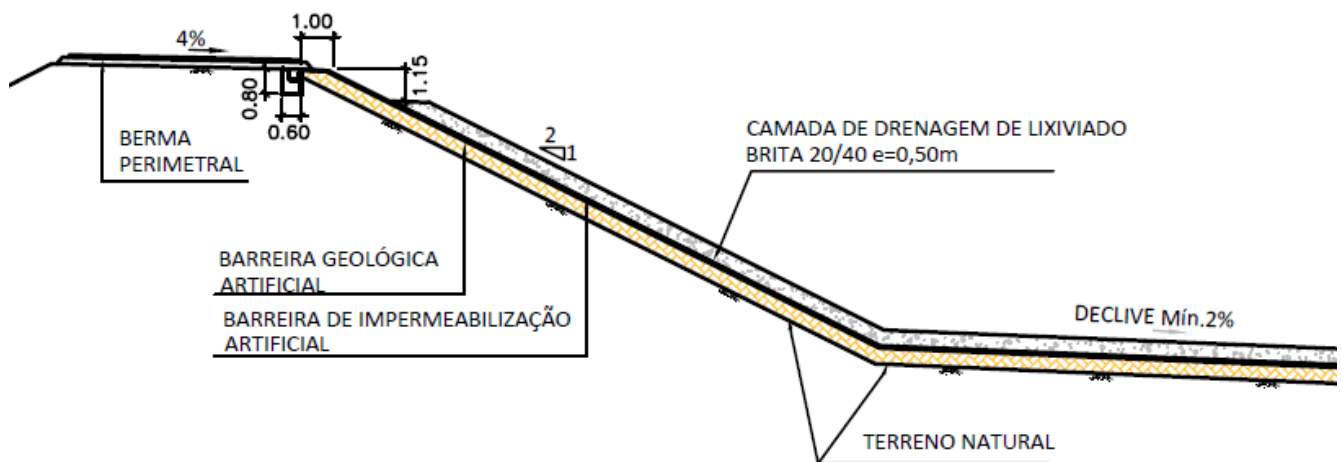


Figura 10 - Secção longitudinal fundo da célula

A secção a ser considerada será aquela que apresente maior inclinação, ou seja, maior altura em menor projeção horizontal.

Este troço mais desfavorável corresponde à zona da encosta que parte da rampa de acesso ao fundo da piscina e chega à primeira berma. Como se observa, este troço tem um declive com inclinação máxima de 2H/1V (26,565°) e tem um desnível de altura do fundo da Célula à berma de 9,40 m, cujas coordenadas são:

Coordenadas	X	Y	Z
Punto 1	21759,4520	148538,3548	928,00
Punto 2	21754,1659	148556,7374	937,40

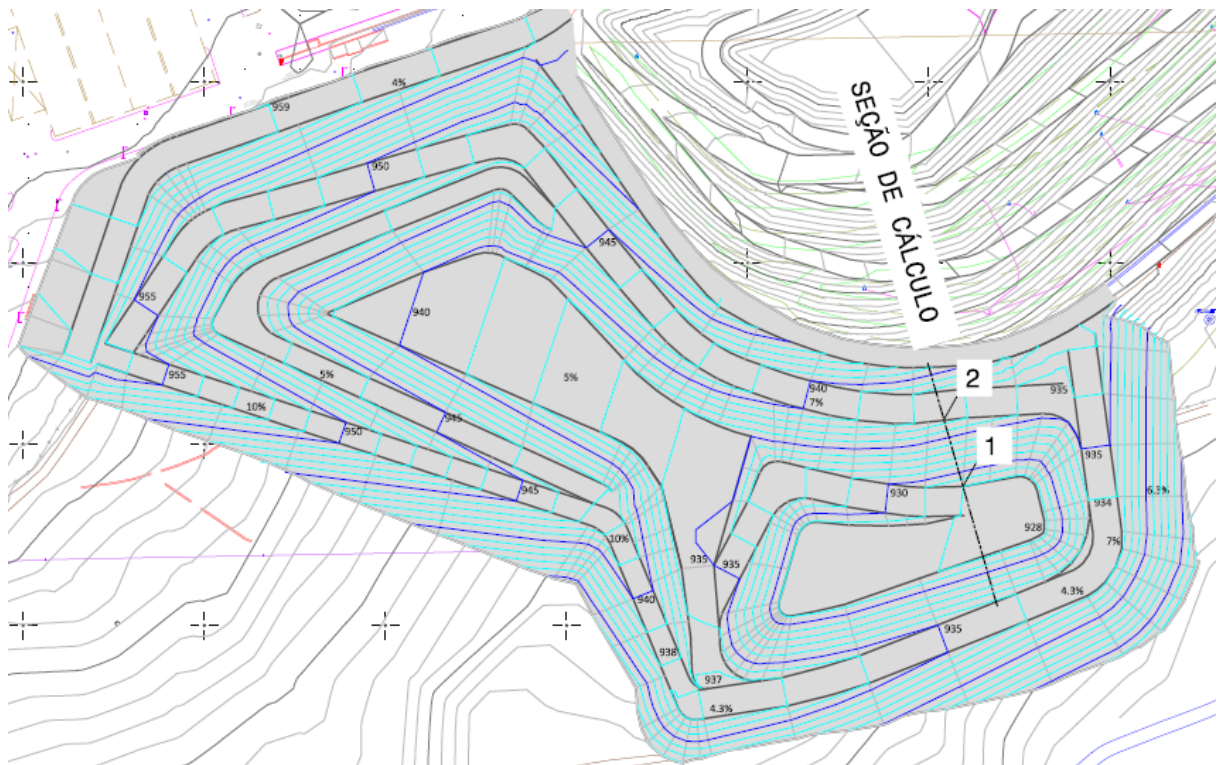


Figura 11 - Fundo da Célula. Secção de cálculo.

6.4 Cálculo de fatores de segurança em camadas de impermeabilização e drenagem

O estudo de estabilidade local entre as diferentes lâminas que compõem o sistema de impermeabilização da Expansão da Unidade de Confinamento de Resíduos de Bigorne será realizado aplicando-se a metodologia prevista na norma UNE 104425:2001.

A formulação utilizada para determinar o risco de deslizamento entre as diferentes camadas é a seguinte:

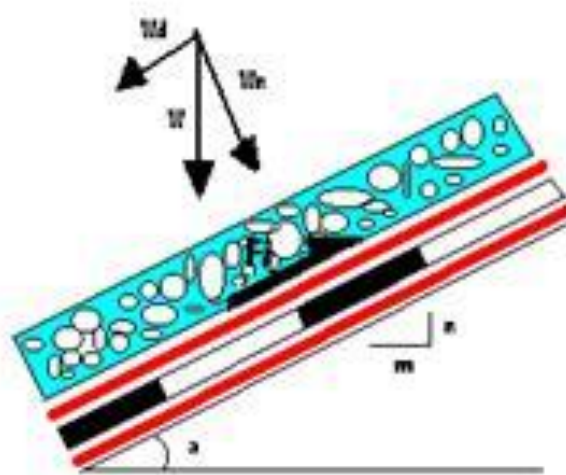


Figura 12 - Diagrama das forças que atuam no talude

Sendo,

W , o peso no sistema de impermeabilização e W_d e W_n , a decomposição do peso nas suas componentes tangente e normal ao plano inclinado:

$$W_d = W \sin \beta$$

$$W_n = W \cos \beta$$

A força de atrito é $F_i = W_n \tan \Phi$, onde Φ é o ângulo de atrito interno dos materiais. A W_d é a que faz geomembrana deslizar.

Sendo, $R = F_i - W_d$

Assim, obtém-se uma resultante, que define a estabilidade do sistema:

Se $R > 0$ Sistema estável

Se $R < 0$ Sistema instável.

Sendo o fator de segurança $CF = F_i/W_d$.

Para realizar o cálculo, foi tido em consideração o seguinte:

- Conforme observável na figura 10, a secção onde existe maior diferencial de cota, este é de 9,40m, assumindo-se 10m, para garantir o lado da segurança.
- Na berma do coroamento será construída uma vala de ancoragem de 0,50x0,50 m², o que implica um peso de terra linear de 450 kg/m, o que contribui para a estabilidade das membranas entre si. Neste caso, não foi considerado porque a secção com maior inclinação, como já mencionado, corresponde à secção que se encontra entre o fundo da cálua e a berma intermediária.
- Não é considerado o peso da brita colocada na berma de crista ou aterro de fecho. Essas camadas contribuem para aumentar o peso de ancoragem e, assim, melhorar a estabilidade ao deslizamento.
- Não é considerado o efeito estabilizador do declive mais acentuado na crista da berma.

Aplicando as características geotécnicas, apresentadas no ponto 6.2. do presente estudo, verifica-se a estabilidade do escorregamento entre diferentes camadas.

A partir dos parâmetros indicados acima, **foram realizados os cálculos de análise de estabilidade ao escorregamento entre diferentes camadas, elaborando uma tabela de dados e resultados para obter o coeficiente de segurança para cada hipótese**, conforme demonstrado abaixo:

6.4.1 Estabilidade ao deslizamento: camada de argila - solo fundo da célula

MATERIAIS	DENSIDADE (Kg/m ³)	ESPESSURA (m)	ALTURA TALUD (m)	ÂNGULO TALUDE β°	DIMENSÃO (m)	W1 (Kg)
Argila	1.900,00	0,50	10,00	26,60	22,33	21.216,77
Geocomposto bentonítico	5,00		10,00	26,60	22,33	111,67
PEAD texturizado	1,88		10,00	26,60	22,33	41,99
Geotêxtil	0,50		10,00	26,60	22,33	11,17
Brita	1.450,00	0,50	10,00	26,60	22,33	16.191,74

CARGAS	DENSIDADE (Kg/m ³)	ESPESSURA (m)	DIMENSÃO (m)	W2 (Kg)
Bermas (ABGE)	2.100,00	0,50	6,00	6.300,00
Ancoragem (terras)	1.800,00	0,50	0,50	450,00

	W1 (Kg)	Ângulo talude β°	W2 (Kg)	Wn	Wd	Ângulo de atrito (Φ°)	Fi	R	CF
Terreno-argila	37.573,33	26,60	0,00	33.596,35	16.823,80	28,00	17.863,50	1.039,70	1,06

6.4.2 Estabilidade ao deslizamento: geocomposto bentonítico - camada de argila

MATERIAIS	DENSIDADE (Kg/m ³)	ESPESSURA (m)	ALTURA TALUDE (m)	ÂNGULO TALUDE β°	DIMENSÃO (m)	W1 (Kg)
Argila	1.900,00	0,00	10,00	26,60	22,33	0,00
Geocomposto bentonítico	5,00		10,00	26,60	22,33	111,67
PEAD texturizado	1,88		10,00	26,60	22,33	41,99
Geotêxtil	0,50		10,00	26,60	22,33	11,17
Brita	1.450,00	0,50	10,00	26,60	22,33	16.191,74

CARGAS	DENSIDADE (Kg/m ³)	ESPESSURA (m)	DIMENSÃO (m)	W2 (Kg)
Bermas (ABGE)	2.100,00	0,50	6,00	6.300,00
Ancoragem (terras)	1.800,00	0,50	0,50	450,00

	W1 (Kg)	Ângulo talude β°	W2 (Kg)	Wn	Wd	Ângulo de atrito (Φ°)	Fi	R	CF
Argila-Geocomposto bentonítico	16.356,56	26,60	0,00	14.625,29	7.323,80	30,00	8.443,92	1.120,12	1,15

6.4.3 Estabilidade ao deslizamento: geomembrana PEAD - geocomposto bentonítico

MATERIAIS	DENSIDADE (Kg/m ³)	ESPESSURA (m)	ALTURA TALUDE (m)	ÂNGULO TALUDE β°	DIMENSÃO (m)	W1 (Kg)
Argila	1.900,00	0,00	10,00	26,60	22,33	0,00
Geocomposto bentonítico	5,00		10,00	26,60	22,33	0,00
PEAD texturizado	1,88		10,00	26,60	22,33	41,99
Geotêxtil	0,50		10,00	26,60	22,33	11,17
Brita	1.450,00	0,50	10,00	26,60	22,33	16.191,74

CARGAS	DENSIDADE (Kg/m ³)	ESPESSURA (m)	DIMENSÃO (m)	W2 (Kg)
Bermas (ABGE)	2.100,00	0,50	6,00	6.300,00
Ancoragem (terras)	1.800,00	0,50	0,50	450,00

	W1 (Kg)	Ângulo talude β°	W2 (Kg)	Wn	Wd	Ângulo de atrito (Φ°)	Fi	R	CF
Geocomposto bentonítico - lâmina PEAD	16.244,90	26,60	0,00	14.525,44	7.273,80	30,00	8.386,27	1.112,47	1,15

6.4.4 Estabilidade ao deslizamento: geotêxtil - geomembrana PEAD

MATERIAIS	DENSIDADE (Kg/m ³)	ESPESSURA (m)	ALTURA TALUDE (m)	ÂNGULO TALUDE β°	DIMENSÃO (m)	W1 (Kg)
Argila	1.900,00	0,00	10,00	26,60	22,33	0,00
Geocomposto bentonítico	5,00		10,00	26,60	22,33	0,00
PEAD texturizado	1,88		10,00	26,60	22,33	0,00
Geotêxtil	0,50		10,00	26,60	22,33	11,17
Brita	1.450,00	0,50	10,00	26,60	22,33	16.191,74

CARGAS	DENSIDADE (Kg/m ³)	ESPESSURA (m)	DIMENSÃO (m)	W2 (Kg)
Bermas (ABGE)	2.100,00	0,50	6,00	6.300,00
Ancoragem (terras)	1.800,00	0,50	0,50	450,00

	W1 (Kg)	Ângulo talud β°	W2 (Kg)	Wn	Wd	Ângulo de atrito (Φ°)	Fi	R	CF
Lámina PEAD - geotêxtil	16.202,91	26,60	0,00	14.487,90	7.255,00	27,00	7.381,95	126,95	1,02

6.4.5 Estabilidade de deslizamento: Camada de drenagem lixiviados - geotêxtil

MATERIAIS	DENSIDADE (Kg/m ³)	ESPESSURA (m)	ALTURA TALUDE (m)	ÂNGULO TALUDE β°	DIMENSÃO (m)	W1 (Kg)
Argila	1.900,00	0,00	10,00	26,60	22,33	0,00
Geocomposto bentonítico	5,00		10,00	26,60	22,33	0,00
PEAD texturizado	1,88		10,00	26,60	22,33	0,00
Geotêxtil	0,50		10,00	26,60	22,33	0,00
Brita	1.450,00	0,50	10,00	26,60	22,33	16.191,74

CARGAS	DENSIDADE (Kg/m ³)	ESPESSURA (m)	DIMENSÃO (m)	W2 (Kg)
Bermas (ABGE)	2.100,00	0,50	6,00	6.300,00
Ancoragem (terras)	1.800,00	0,50	0,50	450,00

	W1 (Kg)	Ângulo talude β°	W2 (Kg)	Wn	Wd	Ângulo de atrito (Φ°)	Fi	R	CF
Geotêxtil -brita	16.191,74	26,60	0,00	14.477,92	7.250,00	27,00	7.376,87	126,87	1,02

6.5 Conclusões

Como resumo dos cálculos realizados anteriormente, anexamos a seguinte tabela com os coeficientes de segurança obtidos para o deslizamento das diferentes camadas que compõem as camadas do sistema de impermeabilização e drenagem de lixiviados da Expansão da Unidade de Confinamento de Resíduos Bigorne.

VALORES DO COEFICIENTE DE SEGURANÇA PARA A SEÇÃO DE CÁLCULO				
Argila -	Geocomposto bentonítico -	Geomembrana PEAD -	Geotêxtil -	Cascalho -
Terreno	Argila	Geocomposto bentonítico	Geomembrana PEAD	Geotêxtil
1,06	1,15	1,15	1,02	1,02

Nos taludes interiores da bacia será utilizado geotêxtil de poliéster não tecido com fibra longa de 800 gr/m². É projetada em poliéster por ser uma fibra muito resistente ao ataque da luz solar, e fibra longa por ser muito resistente à tração.

Além disso, este geotêxtil é capaz de suportar tensões de tração, e se estiver suficientemente ancorado ou lastrado, pode-se supor um aumento em relação à estabilidade anteriormente considerada, para igual inclinação do talude e materiais indicados.

Atendendo aos cálculos efetuados, e mantendo-se sempre do lado da segurança, **verificou-se a estabilidade de deslizamento entre as diferentes lâminas de impermeabilização de acordo com a metodologia prevista na norma UNE 104425:2001 para a Expansão da Unidade de Confinamento de Resíduos Bigorne.**

7 Resistência ao deslizamento das camadas de selagem

7.1 Descrição das camadas de selagem

As camadas de selagem definidas no " Projeto de Execução da Expansão da Unidade de Confinamento de Resíduos Bigorne " são descritas abaixo, (ordenadas do interior para o exterior):

- **Regularização da superfície da célula de confinamento após enchimento**

Antes da construção das camadas de fecho, será realizada uma regularização da superfície, com o objetivo de que esta seja estável e uniforme e com as inclinações adequadas.

Essa regularização será feita por meio de retroescavadora e motoniveladora, e será espalhada uma camada de solo de espessura média de 20 cm.

- **Camada de drenagem de gases**

É a camada inferior da selagem. Tem como missão captar os gases que são libertados pela massa de resíduos e canalizá-los para a parte superior dos poços coletores.

Quando executado nas vertentes exteriores da massa de resíduos, serve também para recolher as exurgências de lixiviado que possam surgir desses taludes, canalizando-as para a camada de recolha e drenagem de lixiviado. É projetada colocando um geodreno sobre toda a superfície do talude e coroamento.

- **Barreira de impermeabilização artificial**

Uma camada de impermeabilização é instalada sobre a camada de drenagem de gases, constituída por uma geomembrana de impermeabilização em PEAD de 1,5 mm de espessura. Esta camada atua como uma barreira impermeável, impedindo a saída de gases da massa de resíduos e a entrada de água da chuva, reduzindo a quantidade de lixiviado gerado.

A referida camada é construída na superfície de coroamento, e nos taludes externos do enchimento. Estende-se até se conectar com a barreira impermeabilização artificial, dando continuidade a esta e criando assim uma superfície impermeável que confina por completo a massa de resíduos.

- **Camada de drenagem de águas pluviais**

É a terceira camada do Sistema de fecho da célula. Constituída por uma camada de material granular da própria escavação com 0,50 m de espessura, colocada em taludes, para melhorar a estabilidade e instalação, pode ser convenientemente substituída por um geodreno sintético similar ao da camada de drenagem do gás.

A sua principal função é conduzir as águas de infiltração que cruzam a cobertura superior do solo e conduzi-las para os drenos localizados ao longo de todos os caminhos de pé de talude, encaminhando essas águas pluviais até aos seus canais naturais de escoamento.

- **Cobertura final com material terroso**

O objetivo desta camada é receber a cobertura vegetal, que servirá de suporte, minimização da erosão superficial e ajuda na recuperação da paisagem da área.

Projeta-se uma camada de 80 centímetros de terra limpa, oriunda de escavação, e sobre ela 20 cm de terra vegetal ou fertilizada.

Como alternativa ao solo superficial, sempre escasso, recomenda-se a mistura do composto com as camadas superiores do solo de escavação, até se obter uma estrutura e composição assimilável ao solo superficial, e que permita o desenvolvimento de plantas.

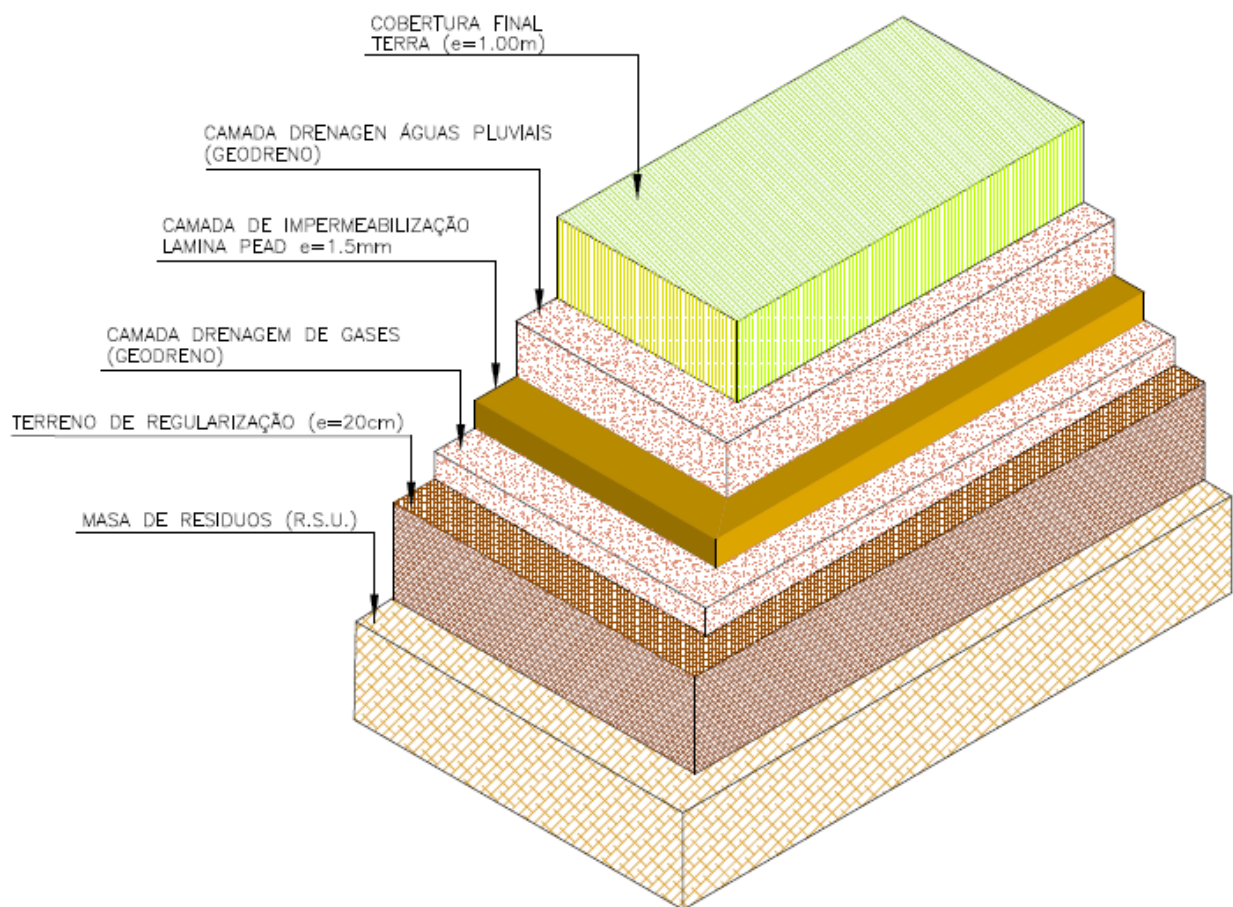


Figura 13 - Esquema camadas de fecho

7.2 Características geotécnicas

Os coeficientes de atrito entre as diferentes camadas que compõem de selagem do aterro podem ser obtidos na tabela a seguir:

Ângulo de rozamiento f	Arcilla	Arena	Grava	Geotextil Agujado	Geotextil Termosoldado	PEAD Rugoso	PEAD liso	Geocompuesto impermeable	Residuos
Arcilla	18								
Arena	22	26							
Grava	24	30	35						
Geotextil agujado	28	28	27	20					
Geotextil termosoldado	23	21	21	20	17				
PEAD rugoso	21	24	35	27	21	30			
PEAD liso	15	18	18	9	8	24	15		
Geocompuesto Impermeable	30	30	28	22	20	30	16	25	
Residuos	30	30	32	25	19	30	12	25	35

Tabla 2 de la Norma UNE 104425:2001

No caso do aterro em estudo, os coeficientes de atrito entre as diferentes camadas são:

	ÂNGULO DE ATRITO
Solo regularizado- Geocomposto drenante	28
Geocomposto drenante -Lâmina PEAD	27
Lâmina PEAD - Geocomposto drenante	27
Geocomposto drenante - Terra de cobertura	28

As camadas de fecho, são as seguintes:

	PESO
Lâmina PEAD e=1,5mm	1,4 Kg/m ²
Geocomposto drenante	4 Kg/m ²
Solo de cobertura	1900 Kg/ m ³

7.3 Secção de cálculo

A estabilidade das camadas de fecho será analisada numa situação em que o aterro esteja cheio e fechado, com a elevação máxima estabelecida em 969,00 m.

A plataforma de vedação superior tem uma inclinação regular e muito suave de 2%, portanto não é necessária nenhuma análise de estabilidade.

O enchimento desenvolve-se colocando os resíduos no fundo da célula, espalhando e compactando-os em camadas sucessivas até atingir o topo da célula. A cada quatro alturas de camada de 2,50 m, será construída uma berma intermediária para que o depósito seja aterrado em taludes com inclinação 2H:1V.

Conforme indicado no " Projeto de Execução da Expansão da Unidade de Confinamento de Resíduos Bigorne ", o perfil será regulado para que os resíduos apresentem **taludes com inclinação de 2H:1V e altura de 10 m. Entre os quais serão instaladas bermas de 6,00 m de largura.**

Conseguindo-se assim uma inclinação geral de 2,60 H: 1V.

A secção a estudar para ficar do lado da segurança será aquele entre as bermas, ou seja, teremos uma altura de 10 m com uma inclinação de 2H:1V, ou seja, 26,565°.

7.4 Cálculo de coeficientes de segurança em camadas do sistema de selagem

O estudo de estabilidade local entre as diferentes camadas que compõem a selagem de fecho da Expansão da Unidade de Confinamento de Resíduos de Bigorne será realizado aplicando-se a metodologia prevista na norma UNE 104425:2001.

A formulação utilizada para determinar o risco de deslizamento entre as diferentes camadas é a seguinte:

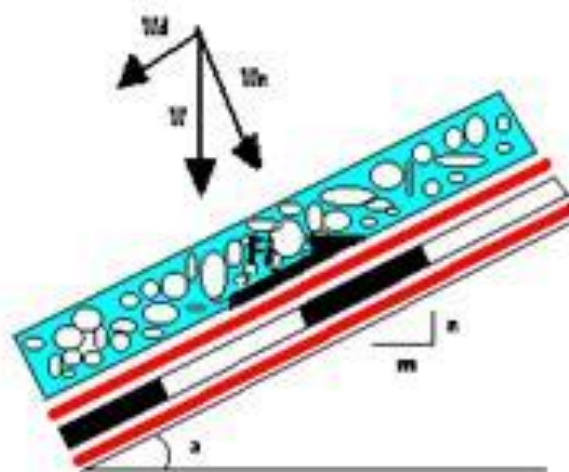


Figura 12 - Diagrama das forças que atuam no talude

Sendo,

W , o peso no sistema de impermeabilização e W_d e W_n , a decomposição do peso nas suas componentes tangente e normal ao plano inclinado:

$$W_d = W \sin \beta$$

$$W_n = W \cos \beta$$

A força de atrito é $F_i = W_n \tan \Phi$, onde Φ é o ângulo de atrito interno dos materiais. A W_d é a que faz geomembrana deslizar.

Sendo, $R = F_i - W_d$

Assim, obtém-se uma resultante, que define a estabilidade do sistema:

Se $R > 0$ Sistema estável

Se $R < 0$ Sistema instável.

Sendo o fator de segurança $CF = F_i / W_d$.

Para realizar o cálculo, foi tido em consideração o seguinte:

- Os cálculos para ficar do lado da segurança serão feitos para uma altura de inclinação de 10 m.
- Considera-se o peso da cobertura e da camada de drenagem colocada na berma. Essas camadas contribuem para aumentar o peso de ancoragem e, assim, melhorar a estabilidade de deslizamento.
- Não é considerado para efeito estabilizador do declive mais acentuado da crista da berma.

Aplicando as características geotécnicas, apresentadas no ponto 7.2. do presente estudo, verifica-se a estabilidade do deslizamento entre diferentes camadas.

A partir dos parâmetros indicados anteriormente, **foram realizados os cálculos da análise de estabilidade ao deslizamento entre as diferentes camadas de selagem para cada um dos taludes em estudo. Uma tabela de dados e resultados é preparada para obter o coeficiente de segurança para cada hipótese**, conforme apresentado abaixo:

7.4.1 Estabilidade ao deslizamento: Geodreno - Terreno regularizado

MATERIAIS	DENSIDADE (Kg/m ³)	ESPESSURA (m)	ALTURA TALUDE (m)	ÂNGULO TALUDE β°	DIMENSÃO (m)	W1 (Kg)
Solo de cobertura	1.900,00	1,00	10,00	26,60	22,33	42.433,53
Geocomposto drenante	4,00		10,00	26,60	22,33	89,33
Lâmina PEAD e=1,5mm	1,40		10,00	26,60	22,33	31,27
Geocomposto drenante	4,00		10,00	26,60	22,33	89,33

CARGAS	DENSIDADE (Kg/m ³)	ESPESSURA (m)	DIMENSÃO (m)	W2 (Kg)
Bermas (solo de cobertura)	1.900,00	1,00	4,42	8.398,00

TALUDE	W1 (Kg)	Ângulo talude β°	W2 (Kg)	Wn	Wd	Ângulo de atrito (Φ°)	Fi	R	CF
Geocomposto drenante- Solo regularização	42.643,47	27,00	8.398,00	46.393,61	19.359,73	28,00	24.667,92	5.308,19	1,27

7.4.2 Estabilidade ao deslizamento: Geomembrana PEAD - Geodreno

MATERIAIS	DENSIDADE (Kg/m ³)	ESPESSURA (m)	ALTURA TALUDE (m)	ÂNGULO TALUDE β°	DIMENSÃO (m)	W1 (Kg)
Solo de cobertura	1.900,00	1,00	10,00	26,60	22,33	42.433,53
Geocomposto drenante	4,00		10,00	26,60	22,33	89,33
Lâmina PEAD e=1,5mm	1,40		10,00	26,60	22,33	31,27

CARGAS	DENSIDADE (Kg/m ³)	ESPESSURA (m)	DIMENSÃO (m)	W2 (Kg)
Bermas(solo de cobertura)	1.900,00	1,00	4,42	8.398,00

TALUDE	W1 (Kg)	Ângulo talude β°	W2 (Kg)	Wn	Wd	Ângulo de atrito (Φ°)	Fi	R	CF
Lâmina PEAD e=1,5 mm - Geocomposto drenante	42.554,13	27,00	8.398,00	46.314,01	19.319,17	27,00	23.598,17	4.278,99	1,22

7.4.3 Estabilidade ao deslizamento: Geodreno- Geomembrana PEAD

MATERIAIS	DENSIDADE (Kg/m ³)	ESPESSURA (m)	ALTURA TALUDE (m)	Ângulo talude β°	DIMENSÃO (m)	W1 (Kg)
Solo de cobertura	1.900,00	1,00	10,00	26,60	22,33	42.433,53
Geocomposto drenante	4,00		10,00	26,60	22,33	89,33

CARGAS	DENSIDADE (Kg/m ³)	ESPESSURA (m)	DIMENSÃO (m)	W2 (Kg)
Bermas (solo de cobertura)	1.900,00	1,00	4,42	8.398,00

TALUDE	W1 (Kg)	Ângulo talude β°	W2 (Kg)	Wn	Wd	Ângulo de atrito (Φ°)	Fi	R	CF
Geocomposto drenante - Lâmina PEAD e=1,5 mm -	42.522,87	27,00	8.398,00	46.286,15	19.304,98	27,00	23.583,97	4.278,99	1,22

7.4.4 Estabilidade ao deslizamento: Solo cobertura - Geodreno

MATERIAIS	DENSIDADE (Kg/m ³)	ESPESSURA (m)	ALTURA TALUDE (m)	ÂNGULO TALUDE β°	DIMENSÃO (m)	W1 (Kg)
Solo de cobertura	1.900,00	1,00	10,00	26,60	22,33	42.433,53

CARGAS	DENSIDADE (Kg/m ³)	ESPESSURA (m)	DIMENSÃO (m)	W2 (Kg)
Bermas (solo de cobertura)	1.900,00	1,00	4,42	8.398,00

TALUDE	W1 (Kg)	Ângulo talude β°	W2 (Kg)	Wn	Wd	Ângulo de atrito (Φ°)	Fi	R	CF
Solo de cobertura - Geocomposto drenante	42.433,53	27,00	8.398,00	46.206,55	19.264,42	28,00	24.568,46	5.304,04	1,28

7.5 Conclusões

Como resumo dos cálculos anteriormente realizados, apresenta-se a tabela que se segue com os coeficientes de segurança obtidos relativamente ao deslizamento entre as diferentes camadas que constituem o fecho da célula de confinamento em estudo, na secção em estudo.

VALORES DO COEFICIENTE DE SEGURANÇA PARA A SECÇÃO DE CÁLCULO			
Geodreno -	Geomembrana PEAD -	Geodreno -	Solo cobertura -
Terreno regularizado	Geodreno	Geomembrana PEAD	Geodreno
1,27	1,22	1,22	1,28

A partir dos resultados obtidos para o talude, podemos verificar que o sistema de fecho definido neste estudo é estável ao deslizamento em taludes com inclinação definida em projeto.

Atendendo aos cálculos efetuados, e sempre do lado da segurança, verificou-se a estabilidade das camadas de fecho entre si de acordo com a metodologia prevista na norma UNE 104425:2001 para as camadas de fecho da célula definidas no Projeto de Execução da Expansão da Unidade de Confinamento de Resíduos Bigorne.