



**ATERRO DE RESÍDUOS NÃO PERIGOSOS DE CASTELO
BRANCO – VERDULHO DE BAIXO – CASTELO BRANCO**

RENOVAÇÃO E ALTERAÇÃO DA LICENÇA AMBIENTAL

OPERADOR: BIOSMART, Soluções Ambientais, S.A.,

**Sistema de Impermeabilização do Fundo e Taludes das
Células a Construir, incluindo o Respetivo Dimensionamento
Versão 2**

(Peças escritas)

ÍNDICE

1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS	3
2.	SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO DO FUNDO E TALUDES.....	4
2.1.	Do fundo da célula	4
2.2.	Outros sistemas	7
3.	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO	7
3.1.	Considerações gerais.....	7
3.2.	Camada de solos de baixa permeabilidade	8
3.3.	Geocompósito bentonítico.....	10
3.4.	Barreiras de impermeabilização artificiais	10
3.4.1.	Considerações gerais.....	10
3.4.2.	Geomembrana de PEAD	11
3.4.3.	Geotêxtil não tecido	13
3.5.	Vala de ancoragem	13
3.6.	Verificação do fator de segurança no trecho inclinado	14
3.7.	Geotêxtil com função de proteção	15
3.8.	Geocompósito drenante.....	17
4.	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO	18
4.1.	Bentonite.....	18
4.2.	Geomembrana	19
4.3.	Geotêxtil com função de proteção	21
5.	CONCLUSÃO	22

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Não sendo as características da barreira geológica natural suficientes, face aos requisitos expressos no Decreto-lei nº102-D/2020 de 10 de Dezembro recorre-se à utilização de um sistema de impermeabilização artificial.

Um sistema de impermeabilização é constituído por um conjunto de camadas sucessivas de diferentes materiais (geossintéticos), com funções de impermeabilização, proteção mecânica da geomembrana, minimização de fugas de lixiviados e drenagem dos líquidos lixiviantes e águas pluviais.

A impermeabilização da zona preparada para a deposição dos resíduos tem como objetivo evitar a possibilidade de qualquer contaminação, quer dos solos envolventes, quer de aquíferos existentes nas suas proximidades mas também aumentar a estabilidade do aterro.

Assim, a colocação de geossintéticos na base e taludes do aterro visa fundamentalmente:

- a) Reduzir as distorções na fundação e no aterro provocadas por tensões de desvio, o que se traduz não só na redução dos deslocamentos (totais e/ou diferenciais);
- b) Aumentar a estabilidade global sobretudo devido à resistência própria do reforço, podendo resultar também de aumentos relativos das resistências mobilizáveis nos solos da fundação e do aterro em consequência de eventuais reduções das tensões de desvio nestes materiais;

Para se atingirem estes objetivos é necessário que os geossintéticos possuam:

- a) Superfície rígidez;
- b) Resistência à tração adequada;
- c) Suficiente resistência na interface solo-reforço;

Por outro lado, estas propriedades devem ser razoavelmente constantes durante o período de vida útil da obra ou, pelo menos, se decrescerem devido à fluência ou à degradação bioquímica, a sua velocidade de diminuição deverá ser menor que a velocidade de aumento da resistência dos solos da fundação devido à consolidação.

Para além destas exigências funcionais, os geossintéticos deverão resistir também às ações relativas às operações de manuseamento, transporte e colocação em obra (colocação de material de aterro,

ações do equipamento de construção, etc...) pelo que deverão ser adequadas as suas características de resistência à perfuração, rasgamento, radiações ultravioletas e temperatura.

Após a execução das terraplanagens deverá proceder-se à regularização e compactação do fundo e dos taludes laterais da célula dos resíduos e à colocação de 0,50 m de solos de baixa permeabilidade e isentos de pedras ou outros elementos que possam perfurar o sistema de impermeabilização, também devidamente regularizada e compactada.

2. SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO DO FUNDO E TALUDES

2.1. Do fundo da célula

O Decreto-Lei nº102-D/2020, de 10 de dezembro, requer que a proteção ambiental inferior de aterros garanta, tanto quanto possível, a prevenção da poluição dos solos, águas subterrâneas e superficiais causada pelos resíduos e lixiviados. Para aterros de resíduos não perigosos, o sistema de selagem inferior deve obedecer aos seguintes requisitos:

•Sistema de proteção ambiental passiva

1. *A camada de solo subjacente ao aterro deve constituir uma barreira de segurança passiva durante a fase de exploração e até à completa estabilização dos resíduos, devendo garantir, tanto quanto possível, a prevenção da poluição dos solos e das águas subterrâneas e de superfície pelos resíduos e lixiviados;*
2. *A barreira de segurança passiva deve ser constituída por uma formação geológica de baixa permeabilidade e espessura adequada, de acordo com as especificações seguintes:*
 - a) *A barreira geológica é determinada pelas condições geológicas e hidrogeológicas subjacentes e adjacentes ao local de implantação do aterro, das quais resulte um efeito atenuador suficiente para impedir qualquer potencial risco para o solo de fundação e as águas subterrâneas;*
 - b) *A base e os taludes de confinamento do aterro devem consistir numa camada mineral natural que satisfaça as condições de condutividade hidráulica e espessura de efeito combinado, em termos de proteção do solo e das águas subterrâneas e de superfície, pelo menos equivalente à que resulta das seguintes condições:*

- ✓ Coeficiente de permeabilidade $\leq 1 \times 10^{-9}$ m/s;
- ✓ Espessura $> 1,0$ m;

c) Caso a barreira geológica não ofereça naturalmente estas condições, deve ser complementada e reforçada artificialmente por outros meios ou materiais que assegurem uma proteção equivalente. As barreiras geológicas artificialmente criadas não podem ser de espessura inferior a 0.50 m.

Os solos subjacentes à base do aterro possuem uma permeabilidade entre 1.5×10^{-9} e 3.0×10^{-9} m/s de acordo com a análise de solos realizada em 2001 no Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Contudo, como podem ocorrer heterogeneidade entre as diversas zonas da célula, em fundos e taludes e em função da profundidade de escavação, em determinadas condições poder-se-á não cumprir o estipulado no Decreto-Lei nº102-D/2020.

Neste caso propõe-se que o sistema de proteção ambiental passivo em toda a célula seja constituído por uma camada de solos de baixa permeabilidade com espessura 0,5 m e uma camada de geocompósito bentonítico com 4.670 g de bentonite/m² ou superior, com fibras agulhadas ao longo dos geotêxteis e uma massa por unidade de área de 5.000 g/m², permeabilidade de $k = 5 \times 10^{-11}$ m/s.

• **Sistema de proteção ambiental ativo**

1. O sistema de proteção ambiental ativo deverá assegurar as seguintes funções:
 - a) *Impedir a infiltração das águas de precipitação pela base e taludes de confinamento do aterro;*
 - b) *Evitar a infiltração de águas superficiais e ou subterrâneas nos resíduos depositados;*
 - c) *Captar as águas contaminadas e lixiviados, garantindo que a sua acumulação na base do aterro se mantenha a um nível mínimo;*
 - d) *Escoar para o sistema de tratamento as águas contaminadas e os lixiviados captados do aterro segundo as normas exigidas para a sua descarga;*
 - e) *Captar, tratar e, se possível, valorizar o biogás produzido;*
2. O sistema de proteção ambiental ativo deve ser constituído por:
 - a) Uma barreira de impermeabilização artificial;

- b) Um sistema de drenagem de águas pluviais;
- c) Um sistema de captação, drenagem e recolha de lixiviados;
- d) Um sistema de captação e drenagem de biogás;

Assim e de um modo resumido o sistema de proteção ambiental ativo do fundo será conseguida pelo conjunto das seguintes camadas (de baixo para cima):

- ✓ **Geomembrana em PEAD lisa em ambas as faces**, com uma espessura de 2,0 mm, que constituirá a barreira ativa. As costuras a realizar nas geomembranas de PEAD, na ligação entre os vários “panos” (soldaduras), respeitaram os regulamentos e regras aplicáveis e aos valores de resistência mecânica e impermeabilidade especificados, que serão aferidos pelos testes a executar;
- ✓ **Geotêxtil não tecido, em polipropileno de 800 g/m²**, com função de proteção mecânica da impermeabilização de fundo e para evitar eventuais problemas de punçoamento;
- ✓ **Camada de areia grossa com 0,20 m de espessura** (areia com granulometria entre 0,6 e 2,00 mm);
- ✓ **Camada drenante, com 0,30 m de espessura constituída por material drenante com $K \geq 1 \times 10^{-4}$ m/s**, isenta de material calcário (exemplo: seixo rolado sem finos);
- ✓ **Geotêxtil não tecido, em polietileno de alta densidade (HDPE) de 500 g/m² resistente aos UV com função de proteção mecânica da camada drenante**. Este revestimento que cobrirá também os taludes, será aplicado em cada zona antes do início da respetiva exploração.

Os taludes possuirão as seguintes camadas após aplicação do geocompósito bentonítico:

- ✓ **Geomembrana em PEAD lisa em ambas as faces**, com uma espessura de 2,0 mm, que constituirá a barreira ativa;
- ✓ **Camada drenante, sintética (Secudran)**, constituído por dois componentes: um núcleo de drenagem para o escoamento/extração de líquidos e uma camada filtrantes que vai proteger o núcleo de drenagem da entrada de sujidades, mas que permite a circulação de água no núcleo de drenagem. Trata-se assim de uma georede com geotêxtil em ambas as faces (massa por unidade de área 600 g/m² com 2 geotêxteis 300 g/m²).

- ✓ **Geotêxtil não tecido, em polietileno de alta densidade (HDPE) de 500 g/m² resistente aos UV.**

2.2. Outros sistemas

A célula de deposição de resíduos possuirá ainda:

- Uma inclinação do fundo igual ou superior a 2%;
- Um sistema de recolha e drenagem de águas pluviais no interior e exterior das células;
- Um sistema de captação, drenagem e recolha de lixiviados para a sua condução para a estação de pré-tratamento de águas lixivantes (ETAL existente);
- Um sistema de captação e drenagem de biogás.

3. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO

3.1. Considerações gerais

A impermeabilização da estrutura de contenção de resíduos em aterro é um objetivo fundamental, de forma a isolar os resíduos (e os produtos líquidos e gasosos que se geram no seu seio) do meio ambiente terrestre e hídrico. A impermeabilidade implica ausência de transferência de massa através de um meio, independentemente do gradiente.

Em meios naturais, tomados à escala do terreno natural e deste tipo de obras e no tempo em que se pretende que sejam efetivas, praticamente não existem locais compatíveis com aquele objetivo, sem a assunção de riscos significativos.

Alguns meios artificiais e processos de engenharia, tanto quanto possível normalizados, contribuem para uma melhor aproximação ao objetivo da contenção efetiva de resíduos, ao poderem aplicar economicamente meios de muito baixa permeabilidade, e duráveis, independentemente da permeabilidade dos terrenos naturais subjacentes.

Este princípio permite estender a praticamente qualquer tipo de terreno, as consequências de isolamento entre dois meios através da interposição de uma barreira de muito baixa permeabilidade.

Os riscos de diminuição de eficiência, rutura ou de deficiência accidental de construção são minorados com a aplicação de regras construtivas e materiais adequados, combinados com a intersecção ativa e a drenagem de potenciais fluidos contaminantes, seguida do seu tratamento e do controlo

periódico por monitorização da integridade do sistema de contenção e de efeitos de contaminação no meio ambiente.

O aterro de resíduos sólidos não perigosos incorpora as exigências técnicas legais em vigor e que resultam da necessidade de normalização de procedimentos assumidos científica e socialmente como eficazes.

O meio hídrico natural, superficial e subterrâneo é o principal destino e veículo de transporte de contaminantes provenientes de aterros, pelo que o desejável seria a construção destas estruturas em meios isentos de porosidade e de água.

O meio geológico existente no local do projeto tem boas características atendendo a que a porosidade dos solos é muito baixa, mas deverá ser reforçada de modo a diminuir os riscos de contaminação do solo.

A aplicação de meios adequados permitirá a otimização entre os meios e a tecnologia.

Assim, a barreira de impermeabilização consistirá:

- Camada de solos de baixa permeabilidade na base do aterro, taludes e banquetas com cerca de 0,50 m de espessura;
- Barreira geológica artificial – constituída por microtela bentonítica 5000 g/m²;
- Geomembrana em PEAD com uma espessura de 2,0 mm.

3.2. Camada de solos de baixa permeabilidade

A permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento de água através dele. Todos os solos são mais ou menos permeáveis.

O conhecimento do valor da permeabilidade dos solos a aplicar na base e nos taludes do aterro é muito importante, para estimar a vazão que percola através da fundação do aterro.

Assim, o coeficiente de permeabilidade dos solos a aplicar deverá ser determinado através de ensaios de laboratório em amostras indeformadas ou de ensaios “in situ”.

Os principais fatores que influenciam no coeficiente de permeabilidade são: granulometria, índice de vazios, composição mineralógica, estrutura, fluído, macroestrutura e a temperatura.

- ✓ **Granulometria** - O tamanho das partículas que constituem os solos influencia no valor de “k”. Nos solos pedregulhosos sem finos (partículas com diâmetro superior a 2mm), por

exemplo, o valor de "k" é superior a 0,01cm/s; já nos solos finos (partícula com diâmetro inferior a 0,074mm) os valores de "k" são bem inferiores a este valor.

- ✓ **Índice de vazios** - A permeabilidade dos solos esta relacionada com o índice de vazios, logo, com a sua porosidade. Quanto mais poroso for um solo (maior a dimensão dos poros), maior será o índice de vazios, por conseguinte, mais permeável (para argilas moles, isto não se verifica). Assim, os solos a aplicar devem ser devidamente seleccionados e compactados.
- ✓ **Composição mineralógica** - A predominância de alguns tipos de minerais na constituição dos solos tem grande influência na permeabilidade. Por exemplo, argilas moles que são constituídas, predominantemente, de argilo-minerais (caulinitas, illitas e montmorillonitas) possuem um valor de "k" muito baixo, que varia de 10^{-7} a 10^{-8} cm/s. Já nos solos arenosos, cascalhentos sem finos, que são constituídos, principalmente, de minerais silicosos (quartzo) o valor de "k" é da ordem de 1,0 a 0,01cm/s.
- ✓ **Estrutura** - É o arranjo das partículas. Nas argilas existem as estruturas isoladas e em grupo que atuam forças de natureza capilar e molecular, que dependem da forma das partículas. Nas areias o arranjo estrutural é mais simplificado, constituindo-se por canalículos, interconectados onde a água flui mais facilmente.
- ✓ **Fluído** - O tipo de fluído que se encontra nos poros. Nos solos, em geral, o fluído é a água com ou sem gases (ar) dissolvidos.
- ✓ **Macroestrutura** - Principalmente em solos que guardam as características do material de origem (rocha mãe) como diáclases, fraturas, juntas, estratificações. Estes solos constituem o horizonte C dos perfis de solo, também denominados de solos saprolíticos.
- ✓ **Temperatura** - Quanto maior a temperatura, menor a viscosidade d'água, portanto, maior a permeabilidade, isto significa que a água mais facilmente escoará pelos poros do solo. Por isso, os valores de "k" obtidos nos ensaios são geralmente referidos à temperatura de 20°C.

O Quadro seguinte apresenta valores típicos do coeficiente de permeabilidade (médios) em função dos materiais (solos arenosos e argilosos). Consideram-se solos permeáveis, ou que apresentam drenagem livre, aqueles que têm permeabilidade superior a 10^{-7} m/s. Os demais são solos impermeáveis ou com drenagem impedida. Estes valores deverão ser usados para uma pré-seleção dos solos a aplicar. Contudo só deverão ser aplicados solos de baixa permeabilidade ou solos impermeáveis após a determinação do Coeficiente de Permeabilidade.

Quadro 1 - Valores típicos do coeficiente de permeabilidade

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

3.3. Geocompósito bentonítico

Para reforço da camada de solos de baixa permeabilidade será aplicado um geocompósito bentonítico com permeabilidade $\leq 5 \times 10^{-11}$ m/s Bentofix 4900 ou seja 5000 g/m² de massa (4670 g/m² de bentonite e geotêxteis de 220 e 110 g/m²) com uma espessura de 6 mm.

3.4. Barreiras de impermeabilização artificiais

3.4.1. Considerações gerais

Neste capítulo é verificado o comportamento da barreira de impermeabilização a instalar no aterro face às características dos resíduos e a configuração do aterro.

Tendo em consideração os dados de base adotados e que constam da tabela seguinte são determinadas as características que os geossintéticos têm que possuir para fazer face às solicitações mecânicas a que vão ser submetidos.

Quadro 2 – Dados de base utilizados para dimensionamento dos geossintéticos

Características admitidas	Gerais	Geotêxtil não tecido	Geomembrana de PEAD
Peso específico de resíduos (valor médio)	10 KN/m ³		
Peso específico de resíduos (valor máximo – fator de segurança)	11,5 KN/m ³		
Peso específico do solo	17 KN/m ³		
Peso específico da camada drenante	20 KN/m ³		
Altura dos resíduos (máxima)	15m		
Altura da camada drenante	0,50 m		
Altura de terras	1,50 m		
Tensão de cedência (KN/m ²)	-	3800	28000

Tensão admissível (KN/m ²)	-	2500 (FS=1.5)	14000 (FS=2)
Ângulos de atrito	-	-	-
PEAD /geotêxtil – a1	-	-	10°
PEAD/geocomposito – a2	-	-	12°
Geotêxtil (camada drenante – a2)	-	18°	
Mobilidade da resistência – b	-	0,05 m	
Inclinação do talude	-	2:1	2:1
Ângulo de inclinação	-	26,6°	26,6°
Diâmetro do agregado da camada de areia (ds)	0,002 m	-	-
Coeficiente de forma do agregado (S)	0,75	-	-
Diâmetro do pilão de ensaio (dp)	0,05 m	-	-

De acordo com o enchimento máximo projetado de 42,00 m, a pressão máxima exercida pela massa de resíduos, camada drenante e terras de cobertura, e cujo valor será usado para dimensionamento será (admitiu-se o peso específico dos resíduos máximo por questões de segurança):

$$P=0,5 \times 20+1,5 \times 42+15 \times 11,5 =245,5 \text{ KN/m}^2$$

(admitiu-se que os resíduos poderão ter um peso específico máximo de 11,5 KN/m³)

3.4.2.Geomembrana de PEAD

Este geossintético tem como principal função servir como barreira de fluidos, evitando qualquer fuga de líquidos para o meio ambiente exterior. Tendo em conta as solicitações a que ficará sujeita terá de obedecer às seguintes características.

Resistência ao Punçoamento

A resistência ao punçoamento é calculada em função da dimensão máxima do agregado que constitui a camada adjacente e é dada pela expressão:

$$F_p = \pi \times (d_s^2/4) \times P$$

No caso presente, em que a camada inferior da camada drenante é areia e entre esta e a geomembrana existe geotêxtil, admite-se que $d_s=0.002 \text{ m}$.

$$F_p = 6.53 \times 10^{-4} \text{ KN} = 0,653 \text{ N}$$

Atendendo a que a geomembrana se encontra protegida pelo geotêxtil não tecido, a resistência ao punçoamento corrigida, dada pela seguinte expressão, com $S=0.75$ (areia) é:

$$F_{pc} = (F_p \times d_s) / (d_s \times S)$$

$$F_{pc}=0,022 \text{ KN}$$

Utilizando um coeficiente de segurança $FS=2$, a resistência mínima ao punçoamento que a membrana deve possuir será de **44 N**.

Tal como se pode verificar pelas tabelas em anexo, uma geomembrana de 2,00 mm possui uma resistência ao punçoamento estático $\geq 500 \text{ N}$, ou seja **11** vezes superior ao valor calculado.

Resistência ao rasgamento

As mesmas considerações feitas no ponto anterior são válidas para este tipo de solicitação cujo cálculo é feito através da expressão:

$$F_r = n \times ds^2 \times P(1-S)$$

$$F_r = 6.53 \times 10^{-4} \text{ KN}$$

Utilizando um coeficiente de segurança $FS=4$, a resistência mínima ao rasgamento que a membrana deve possuir é de 3 N.

Tal como se pode verificar pelas tabelas em anexo, uma geomembrana de 2.00 mm possui uma resistência ao rasgamento (L – direção de fabrico e T – direção transversal ao fabrico) $\geq 120 \text{ N}$.

Resistência à tração e espessura

Tendo em consideração a tensão de cedência da geomembrana de PEAD, a tensão admissível e a inclinação mais desfavorável em talude, para que a geomembrana se mantenha em equilíbrio, as forças horizontais estabilizadoras deverão equilibrar as forças de arranque.

$$e = P_b(tg\alpha_1 + tg\alpha_2) / (14000 \cos 26.6^\circ)$$

$$e = 0.323 \text{ mm}$$

Utilizando um fator de segurança $FS=3$, necessitaremos de uma geomembrana com 1.00 mm de espessura para assegurar o equilíbrio, no entanto está prevista uma geomembrana de 2.00 mm.

A resistência da geomembrana à tração será:

$$R_t = 14\,000 \times 0,002 = 28 \text{ KN/m}$$

3.4.3. Geotêxtil não tecido

Resistência ao punçoamento e rasgamento

Os valores calculados para a geomembrana de PEAD são aplicáveis também para o geotêxtil.

Assim, a resistência mínima ao punçoamento para o geotêxtil será de 44 N. Um geotêxtil de 800 g/m², possui uma resistência ao punçoamento ≥ 3.5 KN, muito superiores aos valores de cálculo.

Resistência à tração e espessura

Tomando em consideração que a resistência à tração se verifica pelo conjunto geotêxtil / membrana a espessura que o geotêxtil não tecido, deve possuir, será:

$$e = P (tga1 + tga2) b / (3800 \cos 26,6^\circ)$$

$$e = 1,5 \text{ mm}$$

Utilizando um fator de segurança FS = 1,5, necessitaremos de um geotêxtil com **2,30 mm** de espessura.

A resistência à tração do geotêxtil será, no mínimo:

$$2500 \times 0,0025 = \mathbf{5,75 \text{ kN/m}}$$

Um geotêxtil de 800 g/m² possui uma resistência à tração (L) e (T) (L – direção de fabrico e T – direção transversal ao fabrico) ≥ 18 KN/m

3.5. Vala de ancoragem

A ancoragem da geomembrana por trincheiras consiste na inserção de parte do seu comprimento em uma vala escavada posicionada a uma distância horizontal mínima da borda do talude a ser protegido.

Esta trincheira de ancoragem é normalmente preenchida com solo local devidamente compactado e de dimensões previamente calculadas.

A ancoragem dos geossintéticos é obtida pela mobilização das forças tangenciais de atrito no contato com o terreno na zona de amarração. As forças tangenciais resultam da tensão normal na zona de contato pela componente representada pela tangente do ângulo de atrito.

Quando estes se encontram na horizontal, a tensão normal resulta da ação do peso das terras colocadas superiormente, e quando se situam na vertical, a tensão corresponde ao impulso em repouso.

A força máxima a transferir para o terreno é de valor igual ao máximo da força de tração admitida na geomembrana.

Assim, temos:

Resistência à tração da geomembrana:

$$R_t = 14000 \times 0,002 = 28,00 \text{ kN/m}$$

Considerando que a vala fica completamente preenchida com terra compactada, a dimensão da vala de ancoragem é dada pela expressão:

$$R_t = 17,00 (h + h') b \operatorname{tg} a^2 + 17,00 L h' \operatorname{tg} a^2$$

em que:

h – altura da vala de ancoragem (1,50m)

b – largura mínima da vala de ancoragem (1,50m)

h' – altura da camada do solo de proteção (0.0 m)

L – distância entre a crista do talude e a vala de ancoragem (1,00m)

a2 – ângulo de atrito geomembrana/geocompósito (12°)

$$R_t = 8.13 \text{ kN}$$

Considerando que a tensão de cedência não é atingida, pode ser utilizado um fator de redução que, no caso presente, vale 3.4.

3.6. Verificação do fator de segurança no trecho inclinado

Os trechos com acentuada declividade constituem situações de risco à geomembrana, principalmente em sistemas de impermeabilização constituídos por várias camadas. Evitando-se taludes muito altos (>10 m) e declividades muito acentuadas, é possível reduzir os riscos de danos na geomembrana.

O procedimento de cálculo apresentado em seguida foi formulado por Koerner (1990), e representa a verificação do Fator de Segurança da geomembrana de PEAD, nos trechos do sistema de impermeabilização com elevada declividade.

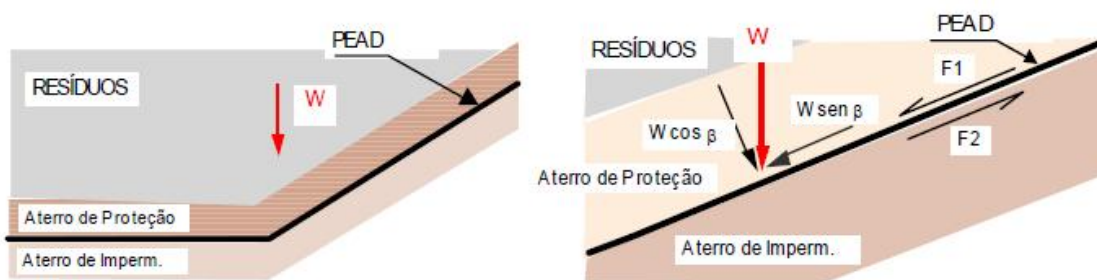


Figura 1 – Diagrama dos esforços de tração aplicados na geomembrana

Caraterísticas	Valores
Espessura da Geomembrana	$t = 2.00 \text{ mm}$
Pressão Máxima	$W = 208 \text{ KN/m}^2$ ou $20,8 \text{ t/m}$
Ângulo do talude	$\beta = 26,6^\circ$
Componente normal ao talude	$N = W \cos \beta = 18,60 \text{ t/m}$ ou 186 KN/m
Ângulo de atrito entre o geotêxtil e a geomembrana - a_1	10°
Força de atrito entre o geotêxtil e a geomembrana	$F_1 = N \tan(a_1) = 3,28 \text{ t/m}$ ou $32,8 \text{ KN/m}$
Angulo de Atrito entre o geocompósito e a geomembrana - a_2	12°
Força de atrito entre o geocompósito e a geomembrana	$F_2 = N \tan(a_2) = 3,95 \text{ t/m}$ ou $39,5 \text{ KN/m}$
Tensão a ser suportada pela geomembrana	$\geq \text{atuate} = (F_2 - F_1)/t = 336,9 \text{ t/m}^2/\text{m}$ ou $3369 \text{ KN/m}^2/\text{m}$
Fator de segurança	$FS = \text{Tensão admitida} / \text{tensão atuante} = 4,15$

Assim, o fator de segurança é superior a 1,00.

3.7. Geotêxtil com função de proteção

O geotêxtil com função de proteção à geomembrana é dimensionado em termos de massa por unidade de área (M) de acordo com a seguinte expressão:

$$P_{ad} = \left[50 + 0,00045 \frac{M}{d^2} \right] \times \left[\frac{1}{MF_s \times MF_{PD} \times MF_A} \right] \times \left[\frac{1}{FS_{CR} \times FS_{CBD}} \right]$$

(in "Robert M. Koerner - Designing with Geosynthetics - 4ª ed. Prentice Hall, 1997")

Onde:

$P_{ad} = P_{ef}/FS$ KPa (Tensão admissível)

$M = g/m^2$ (Massa por unidade de área)

$d = 0,025$ m (Altura de protuberância)

$h = 17$ m (altura máxima camada drenante + resíduos + selagem)

$\gamma = 12,23$ KN/m³ (massa volúmica média $(0,5 \times 20 + 1,5 \times 17 + 15 \times 11,5)$)

$MF_s = 0,5$ (fator de forma)

$MF_{PD} = 0,67$ (fator de densidade)

$MF_A = 0,5$ (fator de efeito de arco)

$FS_{CR} = 1,3$ (fator de segurança para fluência)

$FS_{CBD} = 1,3$ (fator de segurança para degradação química e biológica)

$$[1/(MF_s \times MF_{PD} \times MF_A)] \times [1/(FS_{CR} \times FS_{CBD})] = FF = 3,533$$

$FS = P_{ad}/P_{ef} = 5$ (para altura de protuberância de 0.025 m considera-se um fator de segurança de 5)

$$P_{ad} = P_{ef} \times 5$$

$$P_{ef} = h \gamma = 17 \times 12,23 = 208 \text{ KPa}$$

$$P_{ad} = 208 \times 5 = 1040 \text{ KPa}$$

$$d = 0,025$$

$$d^2 = 0,000625$$

$$M = (P_{ad}/FF - 50)/(0,00045/d^2)$$

$$M = 339 \text{ g/m}^2$$

Assim, seria suficiente um geotêxtil de 500 g/m², no entanto por questões de segurança propõe-se um geotêxtil de 800 g/m² e uma espessura de 5,4 mm.

3.8. Geocompósito drenante

O geocompósito drenante é dimensionado em termos hidráulicos (transmissividade) pelo cálculo seguinte:

Fórmula para cálculo de caudais pluviais (segundo Decreto Regulamentar 23/95, de 23 de Agosto):

$$I = at^b$$

Onde:

I = Intensidade média máxima de precipitação para duração t (min) (L/h.m²)

T = período de retorno (anos)

t = duração de chuva (minutos)

a, b = coeficientes dependentes na localização.

Assim, considerando:

T = 20 anos

t = 15 minutos

a = 317,74

b = -0,538

Obtêm-se Intensidade de precipitação = 74 l/h.m² = 0,0206 l/s.m²

Para o dimensionamento da camada drenante considera-se:

$$qd = I \cdot \cos \beta \cdot f$$

onde qd = caudal de dimensionamento β = inclinação do talude f = fator de segurança

$$\beta = 26,66^\circ = 0,46 \text{ rad} \quad \cos \beta = 0,89 \quad \sin \beta = 0,448$$

$$f = 1,50 \quad qd = 98,81 \text{ L/h.m}^2 = 0,0275 \text{ L/s.m}^2$$

Altura máxima do talude = 6 m Comprimento talude, L = 12 m Q efetivo = qd.L = 1185,8 L/h.m = 0,329 l/m.s

A Georede selecionada possui as características constantes na tabela seguinte.

Carga	Caudal (l/m.s)	
	Inclinação (0,3 %)	Inclinação (1%)
50 Kpa	$6,5 \times 10^{-01}$	$8,0 \times 10^{-01}$
100 Kpa	$5,0 \times 10^{-01}$	$7,0 \times 10^{-01}$

4. CARATERÍSTICAS DO SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO

4.1. Bentonite

A microtela bentonítica é um geocompósito impermeabilizante de expansão controlada destinado à proteção de estruturas de fundação. Trata-se de uma estrutura composta com funções distintas entre os seus componentes. O suporte inferior, constituído por geotêxtil tecido em Polipropileno, tem função constituir a base estável de geocompósito, resistindo ao punçoamento.

A bentonite sódica natural em pó é fixada graças à presença do geotêxtil superior e inferior e ao sistema de agulhagem entre estes. A cobertura agulhada, em toda a superfície assegura uma boa separação e uma boa resistência ao desprendimento, limitando a expansão da bentonite depois da hidratação vertical e horizontalmente.

Assim, a bentonite a aplicar na base, taludes e banquetas do aterro deverá obedecer pelo menos às características constantes no quadro seguinte.

**Quadro 3 – Características e especificações do geocompósito
Bentonítico a aplicar no aterro**

Geocompósito Bentonítico	
Propriedades	Valores Especificados
Massa por unidade de área:	5000 g/m ²
GCL	4670 g/m ²
Polipropileno não tecido (camada superior)	220 g/m ²
Polipropileno tecido (camada inferior)	110 g/m ²
Bentonite Sódica Natural (pó):	

Geocompósito Bentonítico	
Propriedades	Valores Especificados
Conteúdo em montmorilonite	90%
Conteúdo em água	Aprox. 10%
Coeficiente de dilatação	24 ml/2g
Absorção de água	600%
Perda de fluido	18 ml
Propriedades Físicas:	
Espessura seca	6,0 mm
K – Permeabilidade	$2,0 \times 10^{-11}$ m/s
Índice de fluxo	5×10^{-9} (m ³ /m ² .s)
Propriedades Mecânicas:	
Resistência a tracção (rotura):	
Longitudinal	12 KN/m
Transversal	12 KN/m
Extensão na rotura:	
Longitudinal	10 %
Transversal	6 %
Resistência ao Punçoamento	2000 N

4.2. Geomembrana

A aplicação de geomembranas em obras de proteção ambiental apresenta-se como uma alternativa bastante interessante em função das suas características mecânicas e principalmente pela sua espessura, proporcionando um melhor aproveitamento dos volumes disponíveis. Trata-se de um material de origem industrial, ou seja passível de um controle de produção rigoroso, é possível garantir suas propriedades físico-químicas, segundo regulamentações internacionais, algo indispensável para obras que requerem atenção especial por parte das normas que regem os materiais que as derivam.

As geomembranas são geossintéticos de baixíssima permeabilidade ($k=10^{-12}$ cm/s) praticamente impermeáveis. São fabricados em polietileno de alta densidade a partir de resinas virgens e estabilizadas com aditivos, resultando num polímero de alto peso molecular e excelentes

propriedades físico-químicas. A este polímero são agregados aditivos, gerando um produto final de características fundamentais bastante melhoradas. Entre esses aditivos se destacam os termoestabilizantes e antioxidantes que aumentam significativamente a resistência a intempéries. A cor preta torna a geomembrana praticamente imune a ação dos raios ultravioletas emitidos pelo sol, aumentando assim sua vida útil.

Quadro 4 – Características e especificações da geomembrana a aplicar no aterro

Geomembrana	
Propriedades	Valores Especificados
Polímero	PEAD (estabilizado aos raios UV)
Superfície	Lisa
Espessura	2,00 mm
Peso Específico	0,942 g/cm ³
Resistência à tração na cedência (L)	≥ 15 KN/m
Resistência à tração na cedência (T)	≥ 15 KN/m
Resistência à tração na rutura (L)	≥ 30 KN/m
Resistência à tração na rutura (T)	≥ 30 KN/m
Extensão na cedência (L)	10-12 %
Extensão na cedência (T)	10-12 %
Resistência ao rasgamento (L)	≥ 120 N
Resistência ao rasgamento (T)	≥ 120 N
Resistência ao punçoamento estático	≥ 500 N
Teor em negro de fumo	≥ 2 %
Dispersão em negro de fumo	A1/A2
Estabilidade dimensional	≤ 2 %
Período para aparecimento de fissuração	>1500 horas

(L) – direção de fabrico

(T) direção transversal ao fabrico

4.3. Geotêxtil com função de proteção

Para proteção da geomembrana existirá no plano inferior o geocompósito bentonítico e os solos de baixa permeabilidade isentos de pedras já descritos anteriormente e superiormente será protegida no fundo do aterro com um geotêxtil de 800 g/m² e nos taludes com uma georede com geotêxtil de 300 g/m² em ambas as faces e um segundo geotêxtil de proteção de 500 g/m².

Quadro 5 - Características do Geotêxtil (PP) 800 g/m²

Geotêxtil (PP) 800 g/m ²	
Propriedades	Valores Especificados
Tipo	Não tecido; Agulhado
Composição/Quant. do Polímero	100% Polipropileno
Massa por unidade de área	800 g/m ²
Espessura	5,4 mm
Requisitos para Filtro:	
Porometria	< 0,10 mm
Permeabilidade:	
Vertical	4,5 x 10 ⁻² m/s
Horizontal	1 x 10 ⁻⁴ m/s
Requisitos Mecânicos:	
Deformação ao punçoamento	50 mm
Resistência ao punçoamento	3800 N
Alongamento máximo:	
Longitudinal	80%
Transversal	50%
Resistência à tração:	
Longitudinal	19 KN/m
Transversal	28 KN/m

Quadro 6 - Características do Geotêxtil (PEAD) 500 g/m² SECUTEXR501

Geotêxtil (PEAD) 500 g/m ²	
Propriedades	Valores Especificados
Tipo	Não tecido; Agulhado, proteção UV
Composição/Quant. do Polímero	100% Polipropileno
Massa por unidade de área	500 g/m ²
Espessura	4,2 mm
Requisitos para Filtro:	
Porometria	< 0,08 mm
Permeabilidade:	
Vertical	4 x 10 ⁻² m/s
Requisitos Mecânicos:	
Deformação ao punçoamento	40 mm
Resistência ao punçoamento	5200 N
Alongamento máximo:	
Longitudinal	60%
Transversal	40%
Resistência à tracção:	
Longitudinal	22,0 kN/m
Transversal	39,0 kN/m

5. CONCLUSÃO

O sistema de impermeabilização e consequentemente o seu dimensionamento e seleção, bem como o modo de execução são aspetos fundamentais para uma obra desta natureza, e portanto deverão ser tomados os máximos cuidados, admitindo sempre fatores de segurança folgados de modo a garantir que o sistema funcionará.

