



Instituto Superior de
Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS NA CONSTRUÇÃO
DE ATERROS SANITÁRIOS – CASO DE ESTUDO:
ATERRO DO GIESTAL**

João António Nunes Silva

1121351

Relatório de Estágio apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – ramo de Infraestruturas e Ambiente, realizado sob a orientação da Professora Doutora Ana Cristina Meira da Silva e Castro, Professora Adjunta do ISEP.

2014

Júri

- Presidente** *Doutor Rui de Sousa Camposinhos*
Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto
- Orientador** *Doutora Ana Cristina Meira da Silva e Castro*
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto
- Arguente** *Doutor Paulo Jorge Ramísio Pernagorda*
Professor Auxiliar, Universidade do Minho

AGRADECIMENTOS

São devidos agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho.

À Prof.^a Doutora Ana Cristina Meira pela orientação e revisão do trabalho, pelo interesse demonstrado pela temática, pelo incentivo, pelo tempo despendido e pelas suas críticas e sugestões que em muito contribuíram a finalização do trabalho.

À DST, na pessoa do Eng.^o José Teixeira, pela oportunidade dada para a realização do estágio.

Aos técnicos de obra Filipe Gomes e Joel Pinheiro e ao controller Tiago Abreu pelo acompanhamento em obra, pelos ensinamentos, pela prontidão e disponibilidade no esclarecimento de dúvidas e, fundamentalmente, pela amizade e boa disposição que sempre demonstraram ao longo do período de estágio.

À Eng.^a Maria João Faria, que sempre se mostrou disponível para colaborar, dando opiniões e fornecendo informação relevantes para a realização de alguns tópicos, bem pelo apoio e prontidão demonstrada na resolução de problemas.

À Eng.^a Catarina Duarte, Eng.^o Henrique Remígio, Eng.^a Joana Melo e Eng.^a Sónia Sousa, da EFS, pela boa disposição e disponibilidade demonstrada no fornecimento de informação e documentação que em muito contribuíram para a concretização deste trabalho.

À Eng.^o Telma Ramos, pelo apoio e disponibilidade demonstrado, bem como pelo fornecimento de documentação relativa à obra.

À equipa de topografia da empresa Soluções Inéditas pela disponibilização de elementos relevantes e pela disponibilidade que sempre demonstraram.

Ao Eng.^o Raul Almeida e Eng.^a Sara Guerra, pela longa amizade e pela ajuda prestada na pesquisa bibliográfica e revisão do trabalho.

Ao Eng.^o Nuno Monteiro, pela amizade, pela ajuda no esclarecimento de dúvidas, e pelos sábios conselhos.

Aos meus tios, José Augusto Silva e Natália Martins, e primos Diogo, Maria e Leonor, pelo acolhimento, carinho e preocupação demonstrados ao longo dos últimos dois anos.

Aos meus pais, pelo apoio e coragem que sempre me transmitiram, e pela compreensão pelo tempo de atenção que não lhes dediquei e pelos momentos de má disposição que como ninguém sabem tolerar.

À Helena pela dedicação, carinho, força, apoio, paciência e companheirismo durante todo este longo percurso.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

RESUMO

Os aterros de resíduos contemplam, na sua constituição, uma série de sistemas e infraestruturas complementares que asseguram o correto funcionamento do mesmo, minimizando os perigos ambientais. A produção de lixiviados no interior das células de confinamento deste tipo de aterro é um fato inevitável sendo necessário, dada a sua perigosidade, o dimensionamento de um sistema de contenção e drenagem que promova o seu escoamento para zonas de tratamento.

O presente trabalho assentou em três vertentes principais: o aprofundamento dos conhecimentos e exposição dos mesmos, na temática relacionada com aterros de resíduos e com a aplicação de geossintéticos neste tipo de infraestrutura, o acompanhamento da construção do novo aterro de resíduos não perigosos da Suldouro, o Aterro do Giestal, que vem substituir o seu precedente, já em fase de selagem, o aterro de Sermonde e a elaboração de uma análise crítica à solução construtiva apresentada no projeto de execução deste aterro.

Neste contexto, é efetuada uma pesquisa bibliográfica exaustiva e assente, essencialmente, na problemática da gestão de resíduos, na utilização de geossintéticos em aterros de resíduos e no seu projeto e construção.

O acompanhamento da obra debruçou-se, essencialmente, sobre a execução do sistema de impermeabilização e de drenagem de lixiviados da célula de confinamento, dando ênfase aos materiais utilizados, nomeadamente os geossintéticos, ao dimensionamento efetuado e aos processos construtivos utilizados e à garantia da qualidade da sua execução. Dados os riscos ambientais associados a este tipo de infraestruturas, são, para além dos sistemas referidos, analisados os elementos do sistema de monitorização de águas subterrâneas, sendo aqui abordados os materiais e processos construtivos.

Por fim, é proposta uma solução alternativa à prevista no projeto de execução dos sistemas de impermeabilização e drenagem de lixiviados. A solução desenvolvida, é inovadora, de custo mais reduzido e com vantagens acrescidas relativamente aos seus processos construtivos e à capacidade de armazenamento.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro Sanitário, Sistema de Impermeabilização, Lixiviados, Geossintéticos, Qualidade.

ABSTRACT

The waste landfills include in its constitution, a number of systems and complementary infrastructures that ensure a correct operation, minimizing environmental hazards. The production of leachate inside the containment cells of this type of landfill is unavoidable. Due to its dangerousness, it is necessary a competent design of both a containment system and drainage system that promotes runoff to treatment areas.

This study was based on three main areas: increasing knowledge related to waste landfills and the use of geosynthetics in this type of infrastructure and exposing it, monitoring the construction of the new landfill for non-hazardous waste from Suldouro, the landfill of Giestal. This infrastructure will replace the already in sealed landfill of Sermonde and conduct a critical analysis of the constructive solution presented in this landfill' execution project.

In this context, it is performed an exhaustive literature review, mainly based on the topics waste management, the use of geosynthetics in waste landfills and landfills design-and-construction.

The monitoring of the fieldwork related to the landfill construction was mainly leaned on the implementation of the waterproofing system and drainage of leachate from containment cell. A particular emphasis was done on the materials used, including geosynthetics, on the design and the constructive processes used and on the assurance of quality during the construction of the landfill. Considering the fact that environmental risks are present in this type of infrastructure, the groundwater monitoring system, as well as its constructive materials and processes, was analysed.

Finally, an alternative constructive solution to the one that planned in the execution project of waterproofing and drainage system leachate is presented. This solution is innovative, less expensive and possesses increased advantages with respect to both its construction processes and storage.

KEY-WORDS: Landfill, Waterproofing System, Leachate, Geosynthetics, Quality.

Índice

Lista de Símbolos e Abreviaturas	xiv
Nomenclatura.....	xviii
Índice de Figuras	xx
Índice de Tabelas	xxiv
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.1.1. Evolução histórica	1
1.1.2. Panorama Nacional	7
1.1.3. Caso em estudo	14
1.2. Objetivos e metodologia	16
1.3. Estrutura.....	17
2. Revisão Bibliográfica	19
2.1. Legislação em vigor	19
2.1.1. Legislação relativa a aterros	19
2.1.1.1. Classes de aterros	19
2.1.1.2. Licenciamento, construção e exploração de aterros.....	21
2.1.1.3. Encerramento e pós-encerramento.....	24
2.1.2. Legislação relativa a resíduos	25
2.1.3. Plano Estratégico para Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU 2020).....	28
3. Drenagem de lixiviados e impermeabilização de aterros.....	35
3.1. Lixiviados	35
3.1.1. Produção de lixiviado: quantificação	35
3.1.2. Caraterísticas dos lixiviados	36
3.2. Impermeabilização de aterros	37
3.2.1. Tipos de geossintéticos	37
3.2.1.1. Geotêxteis.....	46
3.2.1.2. Geogrelhas	49
3.2.1.3. Georredes.....	50
3.2.1.4. Geomembranas	52
3.2.1.5. Geocompósitos.....	54
3.2.1.6. Outros geossintéticos	59
3.3. Construção do sistema de impermeabilização. Considerações	60

3.3.1.	Barreira geológica	60
3.3.2.	Geocompósito bentonítico	62
3.3.3.	Geomembrana	62
3.3.4.	Geotêxtil.....	73
3.4.	Controlo de qualidade do sistema de impermeabilização.....	76
3.4.1.	Garantia da qualidade da construção da barreira geológica natural.	78
3.4.2.	Garantia da qualidade de aplicação de geossintéticos	81
3.4.2.1.	Geomembrana.....	82
3.4.2.2.	Geocompósito bentonítico.....	92
3.4.2.3.	Geotêxtil.....	95
4.	Caso de estudo: o aterro da Suldouro	97
4.1.	Empresa responsável pela construção.....	97
4.2.	Geologia e geotecnia	97
4.3.	Geomorfologia.....	99
4.4.	Hidrogeologia.....	101
4.5.	Impermeabilização	102
4.5.1.	Célula de confinamento	102
4.5.2.	Lagoas de efluente bruto, efluente tratado e tempestade	111
4.5.3.	Amarração de geossintéticos.....	112
4.6.	Drenagem de lixiviados	115
4.6.1.	Determinação de caudal	116
4.6.2.	Dimensionamento do sistema	117
4.7.	Análise de custo da solução prevista em projeto	121
4.8.	Solução alternativa ao sistema previsto em projeto.....	127
4.8.1.	Solução alternativa atendendo a alteração das características de perigosidade da massa de resíduos a admitir	136
5.	Conclusões	145
	Referências bibliográficas	149
	Anexos	153
	Anexo A – Princípios e conceitos básicos relacionados com aterros.....	155
	Anexo B – Materiais	169
	Anexo C – Monitorização de águas subterrâneas	180
	Anexo D – Exemplos de características técnicas dos geossintéticos utilizados.....	189
	Anexo E – Boletim de ensaios realizado ao solo a utilizar na camada de regularização.....	193
	Anexo F – Localização do ponto de recolha da amostra de solo	201

Lista de Símbolos e Abreviaturas

CaCO ₃	-	Carbonato de Cálcio
CH ₄	-	Metano
CO ₂	-	Dióxido de Carbono
Mg ²⁺	-	Magnésio
NH ₄ ⁺	-	Amónia
SO ₄ ²⁻	-	Sulfato
NO ₃ ⁻	-	Nitrato
°C	-	Graus Celsius
A32	-	Autoestrada 32
a.C.	-	Antes de Cristo
ABS	-	Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno
ACT	-	Autoridade para as Condições do Trabalho
AIA	-	Avaliação de Impacto Ambiental
AMTSM	-	Associação de Municípios de Terras de Santa Maria
APA	-	Agência Portuguesa do Ambiente
APCER	-	Associação Portuguesa de Certificação
ARH	-	Administração de Região Hidrográfica
ASSHTO	-	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	-	American Society for Testing and Materials
BS	-	British Standard
CBO	-	Carência Bioquímica de Oxigénio
CBR	-	California Bearing Ratio
CCDR	-	Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional
CDR	-	Combustível Derivado de Resíduos
CE	-	Comissão Europeia
CEN	-	Comissão Europeia da Normalização
CIRVER	-	Centros Integrados de Recuperação Valorização e Eliminação de Resíduos Perigosos
COT	-	Carbono Orgânico Total
CQO	-	Carência Química de Oxigénio
CV	-	Compostagem Verde
CVO	-	Centro de Valorização Orgânica

DIA	-	Declaração de Impacto Ambiental
DL	-	Decreto-Lei
DQR	-	Diretiva-Quadro Resíduos
DST	-	Domingos da Silva Teixeira, S.A.
DVPs	-	Drenos Verticais Pré-Fabricados
EC	-	European Commission
EC	-	Ecocentro
EEA	-	European Environment Agency
EIA	-	Estudo Impacto Ambiental
EN	-	European Norm
ENRRUBDA	-	Estratégia Nacional para a Redução dos Resíduos Urbanos Biodegradáveis
EP	-	Ecopontos
EPA	-	Environmental Protection Agency
EPS	-	Espuma polimérica de poliestireno expandido
ET	-	Estação de Transferência
ETL	-	Estação Tratamento Lixiviados
EUA	-	Estados Unidos da América
GCL	-	Geosynthetic Clay Liners
GCQ	-	Plano de Garantia da Qualidade de Construção
IC	-	Itinerário Complementar
IGAOT	-	Inspeção-Geral do Ambiente e do Ordenamento do Território
IGS	-	International Geosynthetics Society
ISO	-	International Organization for Standardization
LER	-	Lista Europeia de Resíduos
LL	-	Limite de Liquidez
LNEC	-	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LP	-	Limite de Plasticidade
MAOTE	-	Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia
Nº	-	Número
NP	-	Norma Portuguesa
PB	-	Polibutileno
PCIP	-	Prevenção e Controlo Integrados da Poluição
PEAD	-	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	-	Polietileno de Baixa Densidade

PEMD	-	Polietileno de Média Densidade
PERH	-	PERH – Plano Estratégico dos Resíduos Hospitalares
PERSU	-	Plano Estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos
PET	-	Poliéster de tenacidade elevada
pH	-	Potencial de Hidrogénio
PIRSUE	-	Plano de Intervenção de Resíduos Sólidos Urbanos e Equiparados
PN	-	Pressão Nominal
PP	-	Polipropileno
PPRU	-	Programa de Prevenção de Resíduos Urbanos
PTFE	-	Politetrafluoretileno
PVC	-	Policloreto de Vinilo
RARU	-	Relatório Anual sobre Resíduos Urbanos
RCD	-	Resíduos de Construção e Demolição
RCRA	-	Resource Conservation and Recovery Act
REAI	-	Regime de Exercício da Atividade Industrial
RQD	-	Rock Quality Designation
RS	-	Resíduos Sólidos
RSU	-	Resíduos Sólidos Urbanos
RU	-	Resíduos Urbanos
RUB	-	Resíduos Urbanos Biodegradáveis
S.A	-	Sociedade Anónima
SIRAPA	-	Sistema Integrado de Registo da Agência Portuguesa do Ambiente
SGPS	-	Sociedades Gestoras de Participações Sociais
SPT	-	Standard Penetration Test
SST	-	Sólidos em Suspensão Totais
SWDA	-	Solid Waste Disposal Act
TASi	-	Technische Anleitung Siedlungsabfall
TGR	-	Taxa de Gestão de Resíduos
TMB	-	Tratamento mecânico e biológico
UE	-	União Europeia
UE-27	-	União Europeia constituída por 27 países
UT	-	Unidade de Triagem
UV	-	Ultravioleta

Nomenclatura

b	-	Largura	m
d	-	Diâmetro	m
e	-	espessura	m
F	-	Fracturação	
H	-	Altura	m
i	-	Perda de carga	m/m
K	-	Coefficiente de permeabilidade	m/s
K_s	-	Coefficiente de Manning-Strickler	$m^{1/3}/s$
P	-	Pressão	kN/m^2
Q	-	Caudal	m^3/s
q	-	Caudal máximo a drenar	m^3/s
S	-	Secção	m^2
S'	-	Fator de Forma	
R	-	Raio	m
W	-	Estado de alteração	
\emptyset	-	Diâmetro	m
β/δ	-	Ângulos	°
σ_{adm}	-	Tensão admissível	kN/m^2

Índice de Figuras

Figura 1 - Comparação de metas estabelecidas no PERSU com a realidade verificada.....	9
Figura 2 - Distribuição dos sistemas de gestão de resíduos.....	10
Figura 3 - Capitação de RU nos diversos sistemas (kg/hab.ano) (APA, 2014)	14
Figura 4 - Hierarquia dos resíduos.	26
Figura 5 – Classificação de geossintéticos de acordo com a EN ISO 10318:2005	38
Figura 6 - Funções associadas ao uso de geossintéticos	39
Figura 7 – Geossintético com função de reforço: a) interior do maciço; b) na separação de camadas	43
Figura 8 – Geotêxtil com função de proteção	44
Figura 9- Estrutura tipo de geotêxteis tecidos.....	46
Figura 10- Geotêxteis: a) tecido com monofilamento e multifilamento; b) tecido com monofilamento e tira; c) tecido com tiras; d) não tecido com ligação mecânica; não tecido com ligação térmica.....	47
Figura 11 - Mecanismo de interação geogrelha com partículas de solo.....	49
Figura 12 – Exemplo de georredes: a) com malha hexagonal; b) triaxial.	51
Figura 13- Geocompósito drenante	52
Figura 14 - Fabrico de geomembrana por calandragem: a) esquema geral; b) efeitos da calandragem.....	53
Figura 15- Diferentes texturas das geomembranas de PEAD	53
Figura 16 - Processo de ligação por agulhagem	55
Figura 17 – Argila bentonítica agulhada em geotêxtil	55
Figura 18 – Processo de costura de argila bentonítica a geotêxteis	55
Figura 19 – Ligação de núcleo de argila bentonítica a geotêxteis com recurso a adesivos químicos.....	56

Figura 20 – Ligação de núcleo de argila bentonítica a geomembrana com recurso a adesivos químicos.....	56
Figura 21 – Geocompósito drenante, associação de geotêxtil com georrede.....	58
Figura 22 – Geocompósito drenante, geotêxtil com núcleo polimérico: a) malha rígida de nylon; b) núcleo pitonado.	58
Figura 23 – Geossintéticos: a) geocélulas; b) geocolchões	59
Figura 24- Compactador de placa vibratória.	61
Figura 25-Cilindro pés-de-carneiro.....	61
Figura 26 – Exemplo de esquema de colocação de geomembrana.....	63
Figura 27-Disposição de painéis em taludes com comprimento inferior a 15m.	63
Figura 28 – Disposição de painéis com comprimento superior a 15m.	64
Figura 29- Ligação entre painéis referentes à impermeabilização de taludes e zona basal.	64
Figura 30 – Disposição dos painéis em desenvolvimento em curva.....	65
Figura 31- Sentido de colocação da sobreposição na zona basal: a) posicionamento correto; b) posicionamento incorreto.....	66
Figura 32-Soldadura por termofusão (dupla).....	67
Figura 33 – Soldadura extrusão.	67
Figura 34 – Esquema cunha dupla faixa.....	68
Figura 35 – Exemplo de maquina de soldadura por termofusão por cunha.....	69
Figura 36-Representação esquemática execução de soldadura termofusão por cunha.....	69
Figura 37 – Representação esquemática da extrusora.	71
Figura 38- Pormenor de soldadura na intersecção da tubagem com sistema de impermeabilização, zona de talude.	71
Figura 39 - Pormenor de soldadura na intersecção da tubagem com sistema de impermeabilização, zona de septos de separação de alvéolos.	72

Figura 40 – Acessórios utilizados na execução de soldadura por termofusão com recurso a máquina de ar quente.	73
Figura 41 – Método de aplicação do geotêxtil de proteção.	73
Figura 42 – Soldadura com pistola de ar quente : a)pistola de ar quente; b)execução de soldadura	74
Figura 44 – União por costura : a) costura simples ou oração; b) costura em J.....	74
Figura 45- Costura por fio: a)maquina de costura; b) exemplo de execução da costura....	75
Figura 46 –Costura por agrafamento.....	75
Figura 47 - Execução do ensaio de determinação do peso volúmico/teor em água (gamadensímetro).	81
Figura 48 - Ensaio de vácuo: a) Lavagem da zona de soldadura; b) câmara de vácuo.....	86
Figura 49 – Esquematização do procedimento e análise de resultados do ensaio do fio de cobre.	87
Figura 50- Esquematização do modo de aplicação da tração no a) ensaio de arranque e b) ensaio de corte.	87
Figura 51 – Exemplo de recolha e divisão de amostra.....	88
Figura 52 – Esquematização dos tipos de rotura possíveis para ensaios de arranque e corte, em função do tipo de soldadura.....	89
Figura 53 - Exemplo de execução de remendo em geomembranas.....	90
Figura 54 - Critérios de aceitação/rejeição para soldaduras de geomembrana em aterro de resíduos.....	90
Figura 55- Esquema de método de ensaio com sistema fixo de deteção e localização de orifícios / Gráfico de diferença de potencial.	91
Figura 56 - Esquema de método de sonda elétrica móvel.	92
Figura 57 – Logótipo da empresa.....	97
Figura 58 - Localização do novo aterro da Suldouro	100

Figura 59- Mapa de zonamento sísmico de Portugal Continental com a referência da localização da infraestrutura.....	101
Figura 60 – Pormenor do sistema de impermeabilização da zona basal.....	103
Figura 61 – Pormenor dos septos de divisão de alvéolos	110
Figura 62- Pormenor do sistema de impermeabilização implementados nos taludes da célula de confinamento	110
Figura 63 - Pormenor do sistema de impermeabilização das lagoas de efluente bruto e tratado.....	111
Figura 64-Pormenor da impermeabilização da lagoa de tempestade.....	112
Figura 65 - Pormenor de amarração de geossintéticos ao nível das banquetas.....	114
Figura 66- Pormenor de amarração de geossintéticos na crista de talude/intersecção com a via de circulação circundante da célula.	114
Figura 67-Pormenor da vala de amarração de geossintéticos das lagoas.	115
Figura 68 – Configuração dos sistema de drenagem de lixiviados.	115
Figura 69 – Percentagem de humidade relativa a cada tipo de resíduo.....	116
Figura 70 –Pormenor do sistema de drenagem de lixiviados.	118
Figura 71 – Exemplo do sistema de impermeabilização do aterro intermunicipal da AMTSM (Associação de Município de Terras de Santa Maria) datado de 1993.	122
Figura 72- Pormenor do sistema de impermeabilização proposto	128
Figura 73- Pormenor do dreno de recolha da solução proposta	128
Figura 74 –Configuração do sistema de drenagem com o novo sistema de recolha.....	130
Figura 75-Esquema do sistema de impermeabilização e drenagem de lixiviados alternativo.	137
Figura 76 – Pormenor do dreno de recolha de lixiviados do sistema alternativo.....	137

Índice de Tabelas

Tabela 1-Distribuição da produção de resíduos na EU-27	6
Tabela 2 – Infraestruturas de valorização e eliminação de resíduos em Portugal (2004).....	8
Tabela 3- Lista de aterros sanitários em Portugal, 2012.....	11
Tabela 4- Outras infraestruturas de gestão de RU em 2012.....	12
Tabela 5- Infraestruturas previstas.....	13
Tabela 6- Resíduos admitidos em aterros para resíduos inertes.....	20
Tabela 7- Resumo normativo referente a aterros sanitários.....	25
Tabela 8- Resumo da legislação aplicada a resíduos.	27
Tabela 9-Metas por sistema de gestão de RU em Portugal Continental para 2020.....	32
Tabela 10 - Investimento previsto para as prioridades definidas no PERSU 2020	33
Tabela 11 – Constituição típica de lixiviados em aterros não perigosos	37
Tabela 12 – Funções associadas a cada tipo de geossintético	39
Tabela 13 –Caraterísticas maquinas de soldadura por extrusão.	69
Tabela 14- Ensaio ao solo.....	78
Tabela 15- Parâmetros a controlar na execução das camadas.	80
Tabela 16- Ensaio não destrutivos e respetivas normas.	85
Tabela 17-Gama de pressões para ensaio de ar comprimido em geomembranas.....	86
Tabela 18 –Ensaio a realizar para controlo de fabrico de geocompósito.....	93
Tabela 19- Propriedades da bentonite utilizada no núcleo do geocompósito bentonítico	105
Tabela 20 – Caraterísticas do geotêxtil a utilizar no geocompósito bentonítico	105
Tabela 21 - Propriedades do geocompósito a aplicar	106
Tabela 22 – Caraterísticas da geomembrana a aplicar.....	107
Tabela 23 - Propriedades do geotêxtil de proteção a aplicar	108

Tabela 24 - Caraterísticas da vala de amarração dos geossintéticos.....	113
Tabela 25 – Coeficientes de Manning-Strickler para diversos materiais.	119
Tabela 26 –Coeficientes de permeabilidade para materiais.....	119
Tabela 27- Análise de custos sistema de impermeabilização e recolha de lixiviados aplicado no novo aterro de resíduos da Suldouro.....	123
Tabela 28 – Custos associados à execução da solução proposta.....	130
Tabela 29 - Custos associados à execução da soluçã o proposta.....	138

1. Introdução

1.1. Enquadramento

1.1.1. Evolução histórica

A produção de resíduos é uma problemática associada à vivência do Homem em comunidade, não sendo de fácil resolução. A evolução da sociedade e conseqüente crescimento da população levou, naturalmente, a um aumento da quantidade e variedade de resíduos produzidos, levando, por sua vez, à necessidade de um maior cuidado na sua gestão e tratamento.

Desde os primórdios da humanidade que o Homem produz “lixo” e se vê na obrigação de se desfazer dele. Os primeiros resíduos produzidos pelo Homem eram muito específicos e derivavam dos seus hábitos de caça sendo, nomeadamente, cinzas de fogo, restos de órgãos, ossos e resíduos vegetais que, devido às suas quantidades quase insignificantes, eram simplesmente enterrados servindo para melhorar as condições de fertilidade do solo. (Rathje & Murphy, 1992).

Segundo Martinho (2000), durante a Idade do Bronze, cerca de 3300 a.C., na cidade de Tróia, os resíduos produzidos eram deixados no chão das habitações, sendo periodicamente cobertos com terra. Este fato foi constatado pelo arqueólogo C.W. Blegen, que refere, ainda, que em muitos casos foi mesmo necessário reconstruir os telhados e a porta de entrada das habitações, tal era a altura de resíduos acumulados.

Até então, para o Homem, a deposição de resíduos era de fácil resolução bastando desfazer-se deles em qualquer local. No entanto, a constante evolução das populações obrigou a adopção de outras “políticas” de tratamento dos resíduos, surgindo os primeiros locais para a sua deposição em 3000 a.C.. Estes locais não eram mais que simples buracos onde se depositavam os resíduos, sendo posteriormente cobertos com solo (Franchetti, 2009).

Há cerca de 4000 anos surgem os primeiros relatos da reutilização de materiais como couro, madeira e resíduos de alimentação, sendo estes aproveitados para vestuário, construção e alimentação de animais, respetivamente. São também conhecidos fatos da existência de “reciclagem” e “reutilização” de sucata de bronze por toda a Europa, e da realização de compostagem como forma de tratamento dos resíduos orgânicos, convertendo-os em fertilizante, por parte dos chineses (Rathje & Murphy, 1992).

No ano de 500 a.C., surge em Atenas, a primeira lixeira municipal. O aparecimento desta lixeira revela também o início de uma consciencialização da perigosidade dos resíduos para a saúde pública. Tal fato é demonstrado pela imposição de um lei que obrigava os

varredores de rua a depositar o lixo a uma distância de uma milha para além das portas da cidade (Williams, 2005).

Mais recentemente, era prática comum nas grandes metrópoles a deposição de lixo e dejetos humanos nas ruas, tendo em muito contribuído este fato para o aparecimento de pestes, nomeadamente a Peste Negra no século XIV, responsável pela morte de cerca de metade da população da Europa (Tchobanoglous, Theison, & Vigil, 1993).

Com a Revolução Industrial, a problemática do tratamento de resíduos agrava-se devido ao aumento da quantidade e variedade dos mesmos. A partir de 1800 teve início uma fase de “consciência ambiental” por parte dos governantes, levando ao início da recolha do lixo depositado nas ruas, tendo como destino final a sua deposição em lixeiras, inceneração ou simplesmente o seu lançamento ao mar. No final deste século, aliado aos avanços tecnológicos, iniciou-se a criação de sistemas municipais de saneamento, estando incluídos nestes, a limpeza de ruas e recolha de esgotos (Martinho & Gonçalves, 2000).

Até ao início do século XX os métodos para tratamento de resíduos consistiam apenas na sua deposição sobre o solo ou em valas, em descargas para linhas de água, ou na sua queima. Na década de 20, surgem em Inglaterra os primeiros aterros sanitários, designados de *controlled tipping*, que eram semelhantes a vazadouros controlados. Este tipo de construção, inovador para a época, já incluía alguns princípios e preocupações, tais como a cobertura das células onde eram depositados os resíduos, de forma a evitar odores e outros fatores prejudiciais à saúde pública (McBean, Rovers, & Farquhar, 1995).

No Reino Unido é aprovado em 1936 o *Public Health Act*, que tem essencialmente duas finalidades. A primeira era dotar as autoridades locais de poderes para intervir, caso a deposição de resíduos fosse feita fora dos locais destinados a esse efeito, e a segunda era a proibição da construção sobre terrenos contaminados. Em 1947, ainda no Reino Unido, surge o *Town and Country Planning Act* elaborado com o objetivo principal de atribuir às autoridades locais a responsabilidade pelo controlo dos novos locais de deposição de resíduos. Este plano não atingiu os seus objetivos, pois as autoridades locais não eram capacitadas de meios para efetuar esse controlo (Hawkins & Shaw, 2004).

Os aterros como obra de engenharia surgem pela primeira vez nos Estados Unidos da América (EUA) na década de 30 pela mão Jean Vincenz, responsável pela conceção do aterro sanitário de *Fresno* e responsável, à data, pelo departamento de obras públicas da cidade de *Fresno*. O aterro sanitário de *Fresno*, conhecido como o primeiro aterro sanitário moderno, foi inaugurado em 1937 e encerrado em 1987, estimando-se que nos 50 anos de funcionamentos tenham sido depositados entre 4,7 e 8 milhões de metros cúbicos de resíduos (Melosi M. V., 2002).

Cerca de 11 anos após a abertura do aterro de *Fresno* entra em exploração o que é considerado um dos maiores aterros sanitários do mundo, o aterro de *Fresh Kills*, em Nova Iorque, ocupando uma área de 8,9 km². A 22 de Março de 2001 este aterro é encerrado. No entanto, foi ainda, temporariamente utilizado, após os ataques de 11 de Setembro de 2001, como campo de classificação para cerca de um terço dos escombros do *Ground Zero* (France, 2008); (Nordgrén, Goldstein, & Izeman, 2002). Em 2008 começaram as obras de conversão da zona do aterro em parque. O parque de *Fresh Kills* será cerca de três vezes maior que o *Central Park*, integrando vida selvagem e uma variedade de recursos e espaços públicos para vários tipos de atividades. Está prevista, ainda em 2015, a instalação de 35 mil painéis solares em cerca de 19 hectares, garantindo uma produção de 10 Megawatts de eletricidade (Hickman, 2013).

Em 1959 foram definidas, pela Sociedade Americana de Engenheiros Civis, diretrizes para os novos aterros sanitários. Estas diretrizes sugeriam que os resíduos fossem compactados e cobertos com solo diariamente, de forma a minimizar a formação de odores e o aparecimento de roedores e outros tipos de animais. Contudo, estes aterros ainda não possuíam uma adequada barreira protetora, permitindo a percolação de águas lixiviadas, levando à contaminação de solos, linhas de água e águas subterrâneas (Franchetti, 2009).

A primeira lei referente a gestão de resíduos surge também nos EUA, em 1965. É designada por *Solid Waste Disposal Act* (SWDA), sendo posteriormente revogada pela *Resource Conservation and Recovery Act* (RCRA), em 1976, de forma a implementar uma política de distinção entre resíduos perigosos e sólidos (Williams, 2005).

Em 1979 a *Environmental Protection Agency* (EPA) dos EUA, implementa os primeiros critérios para a construção de aterros sanitários, onde se incluíam normas para a sua localização e funcionamento, sendo que as normas de funcionamento eram aplicadas também aos aterros já existentes (Melosi M. , 2004).

Na década de 70 e 80, a deposição de resíduos em aterros tornara-se prática comum por toda a Europa. No entanto, a falta de cuidado na deposição dos resíduos, mais concretamente a deposição indiscriminada dos mesmos, aliada a proteções deficientes das células de deposição, levaram à produção de emissões poluentes para a atmosfera e à contaminação de solos e águas. Um importante exemplo desta prática é atribuído à Alemanha, que na década de 70 possuía já cerca de 50000 locais para deposição de resíduos (Hempen, 2005). De forma a resolver esta situação, foi instituída a primeira lei de Gestão de Resíduos nesse país, em 1986. Contudo, segundo Weissenbach (2008) quatro anos após a implementação desta lei ainda existiam, por toda a Alemanha, cerca de 8273 aterros sanitários. Este número foi reduzindo substancialmente a partir de 1993 com a

aprovação das *Technische Anleitung Siedlungsabfall* (TASi). Estas estabeleciam requisitos para legalização, projeto, operação e tipos de resíduos admitidos em cada aterro, e conduziram uma redução do número de aterros de para cerca de 560 (Hempen, 2005). Segundo a *European Environment Agency* (EEA, 2013) a produção de resíduos na Alemanha passou de 52,1 milhões de toneladas em 2001 para 47,7 milhões em 2010. Devido às políticas implementadas, de forma a limitar a deposição em aterro na década de 90, em 2010 na Alemanha, o nível de reciclagem chegou a valores de 62% e para a incineração a 37%, sendo que a deposição direta de resíduos em aterro era quase nula.

Nos EUA, surge em 1991, pela mão da EPA, o *Solid Waste Disposal Facility*. Neste documento eram, fundamentalmente descritos requisitos de localização, operação, projeto, monitorização de águas subterrâneas, produção de biogás e critérios de encerramento de aterros de resíduos sólidos urbanos (Franchetti, 2009). Dados revelados pela EPA, indicam que a produção de resíduos nos EUA passou de 88 milhões de toneladas em 1960 para 254 milhões em 2007, havendo um pequena redução para o ano de 2012, sendo o valor de 251 milhões de toneladas. Referente ainda aos EUA, é de salientar a evolução da preocupação com o destino a dar aos resíduos, desde 1960 até 2012. Esta preocupação é verificada pelo decréscimo da proporção de resíduos depositados diretamente em aterro, que passou de 93% em 1960, para 50% em 2012, acompanhando assim a diminuição no número de infraestruturas deste tipo, que em 2012 eram 1908. Contudo, como consequência da diminuição da quantidade de resíduos enviados para aterro, houve aumento do valor de resíduos enviados para reciclagem, incineração e compostagem (EPA, 2014).

No caso da União Europeia (UE), é aprovada em 1975 a Diretiva-Quadro Resíduos, direcionada a resíduos perigosos. Um dos problemas na gestão deste tipo de resíduos é relativo aos movimentos transfronteiriços, tendo estes atingido dimensões preocupantes na década de 80. Este fato foi proporcionado pela implantação de medidas ambientais mais rigorosas, que levaram a um aumento da preocupação no tratamento dos resíduos, acarretando custos mais elevados. De forma a minimizar os custos do tratamento destes resíduos, alguns países optaram pelo envio dos mesmos para países menos desenvolvidos. A constatação deste tipo de prática levou à elaboração, no final da década de 80, da Convenção de Basileia (EC, 2005).

O principal objetivo da Convenção de Basileia é a proteção do meio ambiente, dos fatores agressivos originários dos resíduos perigosos, domésticos e de outros tais como os resíduos provenientes de cinzas de incineração. De forma a garantir este objetivo, a Convenção definiu alguns pontos importantes, onde seria necessário intervir, tais como a minimização da produção de resíduos e o controlo dos seus movimentos transfronteiriços (UNEP, 2011).

A definição destes pontos, levou a crescimento da deposição de resíduos em aterros e da quantidade de resíduos enviados para incineração e reciclagem. No entanto, a adoção destas técnicas para tratamento de resíduos apresentavam grandes lacunas, que resultaram em graves problemas ambientais. Para o preenchimento destas lacunas foram implementadas diretivas – a Diretiva Aterro (Diretiva 1999/31/CE) e a Diretiva 2000/76/CE.

A Diretiva Aterro apresenta definições para:

- Classes de resíduos
 - Urbanos;
 - Perigosos;
 - Não perigosos;
 - Inertes.
- Classificação para os aterros
 - Aterros de resíduos perigosos;
 - Aterros de resíduos não perigosos;
 - Aterros de resíduos inertes;
- Processos para a admissão de resíduos em aterro;
- Condições para localização, controlo de lixiviados, proteção de solo e processos de acompanhamento para a fase de exploração e pós-encerramento de aterros;
- Metas para a quantidade de resíduos biodegradáveis depositados em aterro. Sobre este ponto, é estabelecido:
 - 75% do total de resíduos biodegradáveis produzidos em 1995 em 2006;
 - 50% do total de resíduos biodegradáveis produzidos em 1995 em 2009;
 - 35% do total de resíduos biodegradáveis produzidos em 1995 em 2016.

A Diretiva 2000/76/CE tem como principal objetivo, prevenir ou reduzir os efeitos prejudiciais no ambiente, provenientes das emissões provocadas por incineração ou coincineração de resíduos. Estes efeitos negativos introduzidos no ambiente, relacionados com o processo de incineração, resultam da emissão de poluentes para a atmosfera, solo, e águas subterrâneas. Assim sendo, de forma a que o objetivo principal seja atingido, a Diretiva 2000/76/CE estabelece valores-limite de emissão para as instalações de incineração e coincineração, bem como as condições de funcionamento e os requisitos

técnicos para obtenção destes. Os valores-limite de emissão para atmosfera encontram-se definidos no Anexo V da presente norma, estando estes divididos em:

- Valores médios diários;
- Valores médios a intervalos de 30 minutos;
- Todos os valores médios obtidos durante o período de amostragem mínimo de 30 minutos e máximo de 8 horas;
- Os valores-limite referente a concentração de dioxinas e furanos;
- E os valores-limite de emissões de concentração de monóxido de carbono (CO) nos gases de combustão.

Os valores-limite para emissão de águas residuais provenientes da depuração de gases de escape são indicados no Anexo IV da referida diretiva. A aferição destes valores deve ser feita de acordo com as técnicas medição descritas no Anexo III.

Anteriormente, em 1996, a Diretiva sobre a Prevenção e Controlo Integrado de Poluição, introduzira um sistema de licenças para o combate à poluição por parte das instalações industriais e agrícolas e estabeleceu normas para atividades relacionadas com resíduos (EC, 2005).

Dados publicados pela Comissão Europeia (EU), em 2005, estimava-se que a produção de resíduos atingira os 1300 milhões de toneladas por ano (EC, 2005).

Segundo dados do (Eurostat, 2012) o total de resíduos produzidos na EU-27 em 2008, segue a distribuição demonstrada na Tabela 1.

Tabela 1-Distribuição da produção de resíduos na EU-27 (Eurostat, 2012)

	Total	Resíduos Perigosos	Resíduos Construção	Industria Extrativa	Industria	RSU
EU-27(milhões ton.)	2616	98	859	727	342,7	221

Nesse ano, do total de resíduos depositados em aterro, 80,3% eram resíduos não perigosos, 8,1% eram resíduos domésticos e 3,0% eram resíduos perigosos.

Mais recentemente e segundo dados publicados pelo (Eurostat, 2013), a quantidade de resíduos produzidos pela UE-27 no ano de 2010 foi de 2570 milhões de toneladas, sendo que 33% correspondem a resíduos provenientes da construção e 28,3% provenientes da indústria extrativa. O mesmo relatório refere, ainda, que 5,4% do total de resíduos tratados na EU-27, foram incinerados, 48,2% dos resíduos foram depositados em aterros ou linhas de água e 46,3% foram enviados para valorização.

Ao contrário do que acontece com a produção de resíduos, que tem vindo a aumentar no período de 2001 a 2010, a deposição de resíduos em aterro diminuiu cerca de 41 milhões de

toneladas neste período. Relativamente aos processos de tratamento de resíduos por reciclagem e incineração, houve um aumento de 28 e 15 milhões de toneladas, respetivamente, sendo dados relativos aos 27 países constituintes da UE à data (EEA, 2013).

No ano de 2012, a produção de resíduos sólidos urbanos atingiu um valor de 492 kg/hab/ano, verificando-se uma diminuição face aos anos de 2008 e 2010, sendo de 520 e 506 kg/hab/ano, respetivamente (Eurostat, 2013).

1.1.2. Panorama Nacional

Em Portugal, a gestão de resíduos começa a ter visibilidade a partir da década de 70. Inicialmente, eram colocados contentores para armazenamento de lixo, de forma indiferenciada, nos pontos mais importantes de cada concelho, sendo este posteriormente recolhido e transportado para os locais destinados a sua deposição, recorrendo a um simples camião. A deposição era feita normalmente em terrenos baldios, vulgarmente chamados de lixeiras, localizadas, geralmente, longe das populações, mas o mais próximo possível dos grandes aglomerados populacionais, de forma a minimizar o custo do seu transporte. Neste sistema, os resíduos eram depositados à superfície do terreno, podendo, ou não, efetuar-se uma separação e acondicionamento dos mesmos (Duarte, 2009).

O acondicionamento de resíduos em lixeiras era um fato preocupante, não só pelas emissões libertadas para a atmosfera, provenientes da queima de resíduos, como também pela produção descontrolada de lixiviados (Figueiredo, 2013).

Em 1996, existiam em Portugal 341 lixeiras, 96 na região Norte, 83 no Centro, 50 na região de Lisboa e vale do Tejo e 20 na região do Algarve (Duarte, 2009).

Face à situação verificada em 1995, relativamente aos requisitos de preservação ambiental, em que 76% dos resíduos produzidos eram depositados diretamente em lixeiras e os restantes 14% em vazadouros controlados, surge, em 1997, o Plano Estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU) (Fernandes, 2006).

Este plano foca-se no objetivo chave de promover medidas de prevenção e de valorização de resíduos, dando maior importância ao encerramento das lixeiras existentes. Para atingir estes objetivos, foram estabelecidas metas a cumprir, tendo como termo de comparação os valores obtidos no ano de 1995.

A elaboração do PERSU baseou-se em princípios introduzidos pela EU, implementando no país princípios de prevenção e valorização e de confinamento de RSU, abrindo caminho para a criação de legislação e licenciamento das respetivas entidades gestoras, através de linhas orientadoras, implantadas para a gestão de resíduos (MAOTDR, 2007). Posto isto,

após a implementação deste plano, a opção de deposição de resíduos concentrou-se em aterros sanitários, projetados com sistemas que permitem o isolamento dos resíduos do solo envolvente e a minimização da produção de lixiviados pela entrada de água proveniente da chuva (Lopes & Conde, 2008).

Com a implementação destas novas políticas, foram criados sistemas de gestão de resíduos através de um modelo de gestão, foram implementados sistemas de recolha seletiva e foram construídas inúmeras infraestruturas destinadas à valorização e eliminação de resíduos (MAOTDR, 2007). Após a aplicação do PERSU, a situação relativa a novas infraestruturas de valorização e eliminação de resíduos atingiu as proporções indicadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Infraestruturas de valorização e eliminação de resíduos em Portugal (2004)

Infraestruturas	Número
Aterros sanitários	33
Unidades de valorização orgânica	6
Incineradoras com valorização energética	2
Estações de transferência	79
Estações de triagem	26
Ecocentros	171
Ecopontos	19493
Lixeiras encerradas	341

(Adaptado de (Russo M. A., 2006))

A aplicação do PERSU promoveu um grande desenvolvimento no setor dos resíduos, principalmente nos resíduos sólidos urbanos (RSU), visto que já no ano de 2002 praticamente a totalidade de RSU produzidos eram direcionados para os destinos mais adequados para o seu tratamento. Embora seja notória a evolução deste setor, algumas das metas estipuladas no PERSU, avaliadas e revistas pelo PERSU II ficaram aquém do estabelecido como mostra a Figura 1.

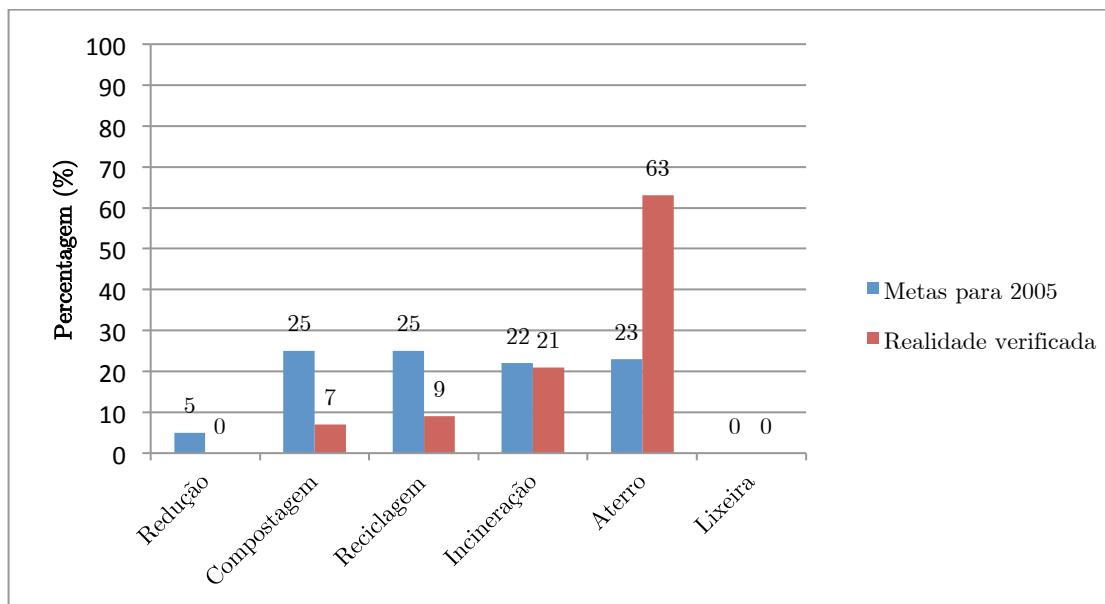


Figura 1 - Comparação de metas estabelecidas no PERSU com a realidade verificada (Adaptado de (MAOTDR, 2007))

Analisando o gráfico, é possível verificar que as metas relativas ao encerramento de lixeiras foram conseguidas. No entanto, a implementação de uma mudança de mentalidade a respeito da produção e tratamento resíduos não foi totalmente conseguida, verificando-se fracos resultados nos processos de compostagem e reciclagem. A deposição direta em aterro superou as metas estabelecidas, demonstrando a importância dos aterros como destino final de resíduos.

Posto isto, em 2007, é implementado, pela portaria 187/2007 de 12 de fevereiro, o PERSU II, com o objetivo de analisar e rever o PERSU e a Estratégia Nacional para a Redução dos Resíduos Urbanos Biodegradáveis enviados para Aterro (ENRRUBDA), instituindo novas metas para o período de 2007-2016. O PERSU II estabelece, ainda, metas prioritárias no âmbito dos RSU e define regras a aplicar na elaboração de planos municipais, intermunicipais e multimunicipais de ação, utilizando parte das orientações estabelecidas no Plano de Intervenção de Resíduos Sólidos Urbanos e Equiparados (PIRSUE). Este plano surge, também, para garantir o cumprimento das metas para 2011, relativamente a reciclagem, valorização de embalagens e resíduos de embalagens e das metas referentes à diminuição da quantidade de resíduos urbanos biodegradáveis (RUB) enviados para aterro, para 2009 e 2016. No entanto, após uma análise no ano de 2013 levada a cabo pelo Ministério do Ambiente, Ordenamento de Território e Energia (MAOTE), verifica-se que a primeira meta não foi cumprida e que a segunda muito dificilmente o será também. A meta estabelecida pela Diretiva Aterro, transposta pelo

Decreto-lei nº183/2009, de redução de 50% da quantidade de RUB depositados em aterro, face ao ano de 1995, ainda após o alargamento do prazo para 2013, relativamente ao previamente estabelecido, 2009, está ainda bastante longe do seu objetivo, verificando-se no ano de 2012 um desvio de 12% (APA, 2014).

Ainda relativamente ao cumprimento de metas comunitárias, é conveniente salientar a presença de uma outra, referente à reciclagem, estando definido na Diretiva Quadro sobre Resíduos (DQR) - Diretiva nº 2008/98/CE, transposta pelo Decreto-lei nº 73/2011, que se deverá verificar um “aumento mínimo global de 50% em peso relativamente à preparação para a reutilização e reciclagem de resíduos urbanos”. Esta meta tem como limite o ano de 2020, sendo verificado que o seu valor no ano de 2012 era de 25% (APA, 2014).

Aquando da aprovação do primeiro PERSU, o número de sistemas de gestão de RSU era de 40, 11 multimunicipais e 29 municipais. Atualmente a gestão de RSU é efetuada por 23 sistemas, 12 multimunicipais e 11 intermunicipais (APA, 2014).



Figura 2 - Distribuição dos sistemas de gestão de resíduos (MAOTE, 2013).

Segundo a (APA, 2014) foram produzidos, em Portugal, 4.782.000 toneladas de RU em 2012, sendo verificada uma redução em cerca de 7% do total produzido no ano anterior. O

destino final dado a estes resíduos seguiu a tendência de anos anteriores, tendo sido depositados em aterro cerca de 54% do total de resíduos produzidos, encaminhados para incineração com recuperação de energia cerca de 20% e os restantes 26%, encaminhados para valorização orgânica e material.

Para o tratamento dos resíduos recolhidos em cada sistema, é necessário que estes possuam infraestruturas que permitam dar o melhor destino a cada tipo de resíduo. A Tabela 3 e Tabela 4 enunciam os aterros e todas as outras infraestruturas de tratamento de resíduos em cada sistema.

Tabela 3- Lista de aterros sanitários em Portugal, 2012 (APA, 2014)

Sistema de gestão	Aterro sanitário
VALORMINHO	Aterro sanitário de Valença
RESULIMA	Aterro sanitário de Viana do Castelo
BRAVAL	Aterro sanitário da Póvoa do Lanhoso
RESINORTE	Aterro sanitário do Alto Tâmega (Boticas)
	Aterro sanitário de Celorico de Basto
	Aterro sanitário de Lamego
	Aterro sanitário de Santo Tirso (resíduos não perigosos)
	Aterro sanitário de Vila Real
LIPOR	Aterro sanitário da Maia
AMBISOUSA	Aterro sanitário de Lustosa (Lousada)
	Aterro sanitário de Penafiel
SULDOURO	Aterro sanitário de Sermonde (V. N. Gaia)
RESIDUOS DO NORDESTE	Aterro sanitário de Mirandela
VALORLIS	Aterro sanitário de Leiria
ERSUC	Aterro sanitário de Aveiro
	Aterro sanitário de Coimbra
PLANALTO BEIRÃO	Aterro sanitário de Tondela
RESIESTRELA	Aterro sanitário do Fundão (resíduos não perigosos)
VALNOR	Aterro sanitário de Avis
	Aterro sanitário de São Martinho (Castelo Branco)
VALORSUL	Aterro sanitário do Oeste (Cadaval)
	Aterro sanitário de Vila Franca de Xira
ECOLEZÍRIA	Aterro sanitário de Almeirim
RESISTEJO	Aterro sanitário da Chamusca
TRATOLIXO	-
AMARSUL	Aterro sanitário de Palmela
	Aterro sanitário do Seixal
GESAMB	Aterro sanitário de Évora
AMBILITAL	Aterro sanitário de Santiago do Cacém

AMCAL	Aterro sanitário de Cuba
RESIALENTEJO	Aterro sanitário de Beja
ALGAR	Aterro sanitário do Sotavento (Loulé)
	Aterro sanitário do Barlavento Algarvio (Portimão)

Tabela 4- Outras infraestruturas de gestão de RU em 2012 (APA, 2014)

Sistema de gestão	TMB	ET	UT	CV	EC	EP	IN	CVO
VALORMINHO	-	1	1	-	2	371	-	-
RESULIMA	-	1	1	-	2	948	-	-
BRAVAL	-	1	1	-	2	1170	-	-
RESINORTE	1	8	4	-	15	3282	-	-
LIPOR	-	-	1	-	21	3484	1	1
AMBISOUSA	-	2	3	-	8	938	-	-
SULDOURO	1	-	1	-	4	1692	-	-
RESIDUOS DO NORDESTE	-	-	-	-	14	596	-	-
VALORLIS	-	3	1	-	4	1007	-	-
ERSUC	2	6	2	-	7	3580	-	-
PLANALTO BEIRÃO	1	3	1	-	19	1470	-	-
RESIESTRELA	1	7	1	-	13	709	-	-
VALNOR	1	7	2	-	13	1792	-	-
VALORSUL	-	5	2	-	8	5514	1	1
ECOLEZÍRIA	-	2	-	-	4	454	-	-
RESISTEJO	-	3	1	-	9	1354	-	-
TRATOLIXO	2	2	-	-	1	3130	-	-
AMARSUL	1	1	1	-	7	2407	-	-
GESAMB	-	3	1	-	7	684	-	-
AMBILITAL	1	4	1	-	7	834	-	-
AMCAL	-	2	1	-	5	111	-	-
RESIALENTEJO	-	5	1	-	5	406	-	-
ALGAR	-	8	-	2	13	2465	-	-

TMB- Tratamento mecânico e biológico

ET – Estação de Transferência

UT- Unidade de Triagem

CV- Compostagem Verde

EC- Ecocentro

EP- Ecopontos

IN- Incineração

CVO- Centro de Valorização orgânica

De forma a cumprir as metas comunitárias previstas, as infraestruturas já existentes demonstram-se insuficientes e em alguns casos desatualizadas, estando prevista, a construção novas infraestruturas e o melhoramento de algumas das já existentes (APA, 2014).

Tabela 5- Infraestruturas previstas (APA, 2014)

Sistema de gestão	Obra prevista
VALORMINHO	Ampliação de aterro
RESULIMA	Ampliação de aterro
BRAVAL	Ampliação de aterro Construção TMB
RESINORTE	Novo aterro
LIPOR	Novo aterro Construção unidade de triagem
AMBISOUSA	Construção TMB Construção ecocentro
SULDOURO	Novo aterro
RESIDUOS DO NORDESTE	Construção TMB Construção estação triagem RS
VALORLIS	-
ERSUC	-
PLANALTO BEIRÃO	-
RESIESTRELA	-
VALNOR	-
VALORSUL	-
ECOLEZÍRIA	-
RESISTEJO	Conclusão de tratamento mecânico
TRATOLIXO	Construção ecocentro Conclusão do novo aterro
AMARSUL	-
GESAMB	Conclusão de TMB
AMBILITAL	-
AMCAL	-
RESIALENTEJO	Conclusão de TMB
ALGAR	Conclusão de TMB Conclusão compostagem de verdes

Dados publicados pela APA (2014), indicam que a capitação média em Portugal foi em 2012 de 454 kg/hab.ano, valor abaixo da média Europeia que nesse mesmo ano foi de 492 kg/hab.ano. A mesma publicação apresenta ainda os valores de capitações observadas em cada sistema, como apresentado na Figura 3.

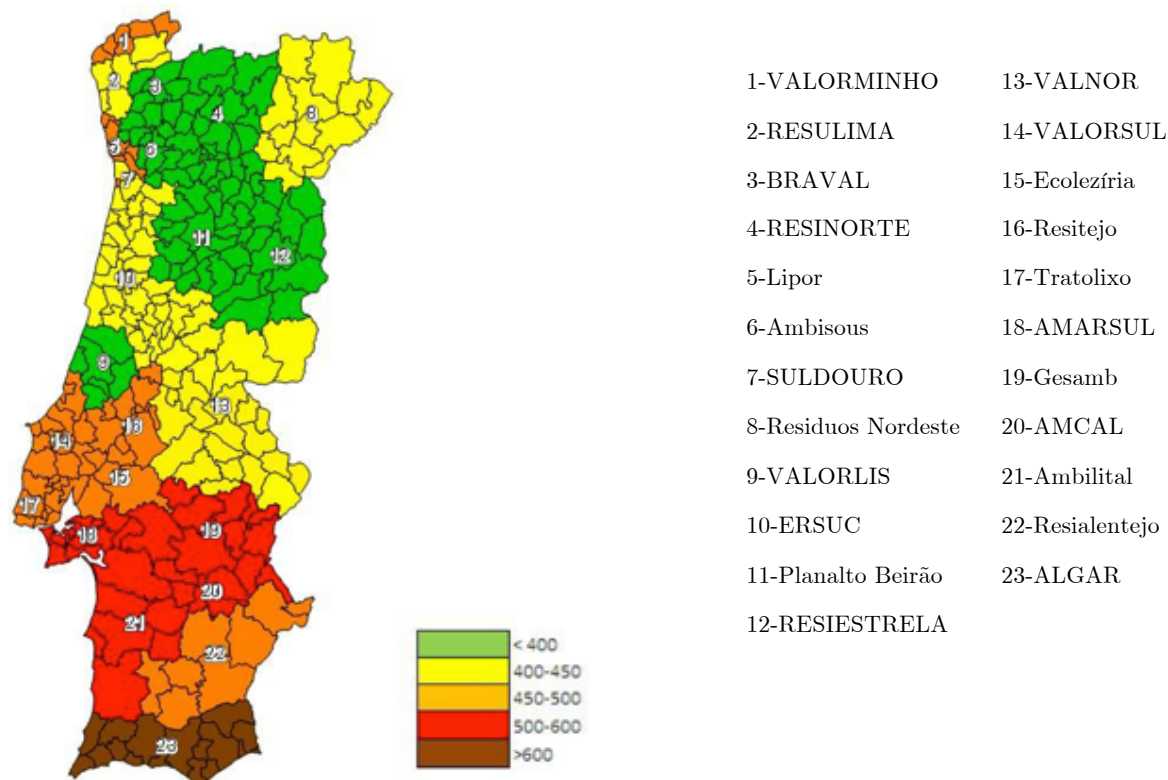


Figura 3 - Captação de RU nos diversos sistemas (kg/hab.ano) (APA, 2014)

Outro fato indicado pela APA (2014), no seu Relatório Anual sobre Resíduos Urbanos (RARU), dá conta que 55% do total de RU produzidos no ano de 2012 correspondem a RUB.

Apesar da grande percentagem de resíduos ainda enviados diretamente para aterro, verifica-se uma diminuição desta prática relativamente a outros anos. Este fato deve-se, em parte, à construção de estações de tratamento mecânico e biológico, bem como a políticas que estabelecem metas de redução de deposição de RUB em aterros, de forma a serem preservados os requisitos ambientais.

1.1.3. Caso em estudo

A elaboração do presente trabalho tem como foco o acompanhamento da construção do novo aterro do Sistema Multimunicipal do Sul do Douro - Aterro do Giestal, a cargo da Suldouro - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos S.A, detentora, em regime concessão, dos direitos de gestão e exploração deste mesmo sistema até ao ano de 2021.

A construção do novo aterro surge de forma a garantir a continuidade do envio de resíduos para o destino final adequado, como os resíduos urbanos produzidos nos concelhos de Vila Nova de Gaia e Santa Maria da Feira. Até então, o destino destes resíduos era assegurado pelo Aterro de Sermonde, que já em finais de 2012 se apresentava no limiar

das suas capacidades de armazenamento. Tal fato, conjugado com a impossibilidade da sua expansão, levou à tomada de decisão da construção de um novo aterro, de forma assegurar a operacionalidade do sistema até ao final da concessão.

A escolha da localização do novo aterro, após a elaboração do Estudo de Impacto Ambiental, recaiu sobre a freguesia de Canedo, mais concretamente no lugar de Sobreda.

À semelhança do aterro precedente, o novo aterro destina-se a resíduos não perigosos, como estabelecido nos termos do artigo 10.º do Decreto-Lei n.º 183/2009, sendo admitidos apenas os resíduos estipulados no ponto 2 do artigo 34.º do mesmo decreto.

Relativamente à obra propriamente dita, o projeto de execução encontra-se dividido em cinco tomos:

- Tomo 1 – Célula de confinamento e área envolvente;
- Tomo 2 – Edifícios de apoio;
- Tomo 3 – Estação de tratamento de lixiviados;
- Tomo 4 – Via de acesso ao aterro;
- Tomo 5 – Projeto de integração paisagística.

A célula de confinamento está concebida de forma a permitir um encaixe total de 2.300.000 m³ de resíduos, repartidos por 5 alvéolos, compreendendo uma área total de 10 ha, e possuindo uma área basal de 1,34 ha. A proteção do solo adjacente à célula é garantida por um sistema de proteção ambiental na zona basal, taludes e banquetas. Neste tomo estão ainda incluídos os sistemas de drenagem de lixiviados da célula, sistema de drenagem de biogás, as vias de acesso circundantes e os respetivos sistemas de drenagem de águas pluviais, e o sistema de monitorização de águas subterrâneas.

Do tomo 2 fazem parte, o edifício administrativo, ecocentro, oficinas, posto de abastecimento e um edifício de caracterização de resíduos, de forma a garantir o apoio necessário na fase de exploração do aterro. Neste tomo poderá incluir-se também o vazadouro interno, onde foram colocadas as terras necessárias para a utilização na cobertura de camadas de resíduos e no encerramento do aterro.

No tomo 3 insere-se a estação de tratamento de lixiviados, designada, a partir de agora, de ETL. Nesta, está incluída a ETL propriamente dita, uma lagoa de regularização de lixiviados, uma lagoa de regularização de efluente tratado, uma lagoa de tempestade e um coletor gravítico que encaminhará o efluente tratado até a rede saneamento do Sistema Multimunicipal do Grande Porto, concessionado pela SIMDOURO, S.A.

A via de acesso ao novo aterro, definida como tomo 4, possui uma extensão de 2.9 Km, fazendo a ligação do aterro as imediações da A32/IC2. Todo o traçado da via se desenvolve por terreno bastante acidentado, atravessando numerosas linhas de água,

proporcionando um número elevado de passagens hidráulicas. Devido ao perfil do terreno, o traçado da via desenvolve-se essencialmente a custa de escavação, levando à necessidade, para além dos sistemas de drenagem longitudinal e transversal da plataforma, de um sistema constituído por valas de crista de talude, de forma a que se garanta a estabilidade dos taludes e não se sobrecarregue os sistema de drenagem da plataforma.

O tomo 5, estabelece os parâmetros para a cobertura vegetal a implantar nas zonas circundantes dos edifícios e vias de acesso, e célula de confinamento, a aquando da construção e encerramento do aterro, respetivamente.

De forma a expor com clareza a obra em causa, é importante ainda referir que para além das redes de drenagem de pluviais, lixiviados e redes de funcionamento da ETL, estão presentes redes de telecomunicações, media tensão, iluminação, abastecimento de água potável proveniente da rede de abastecimento pública, rede de água não potável, para rega e incêndio, proveniente de furos de captação, e rede de esgotos.

Posto isto, resta salientar que, dada a complexidade e dimensão da obra em causa, o presente trabalho irá incidir principalmente sobre o tomo 1 e 3.

1.2. Objetivos e metodologia

O presente trabalho tem como objetivos principais o aprofundamento dos conhecimentos e exposição dos mesmos, na temática relacionada com aterros de resíduos e com a aplicação de geossintéticos neste tipo de infraestrutura e a elaboração de uma análise crítica à solução construtiva apresentada no projeto de execução do aterro do Sistema Multimunicipal do Sul do Douro, o Aterro do Giestal.

Para além destes objetivos principais, foram ainda definidos outros objetivos, segundo os quais se fundamentou a opção pela realização do estágio, sendo estes:

- Compreender, de uma forma prática, as diversas fases associadas à construção de um aterro de resíduos;
- Adquirir e aperfeiçoar o sentido crítico e a capacidade de identificar incompatibilidades no projeto face à realidade da obra, bem como a capacidade de justificação relativamente às soluções alternativas adotadas;
- Promover a capacidade de adaptação ao meio profissional, nomeadamente através do desenvolvimento de trabalho em equipa multidisciplinar.

De forma a atingir os objetivos definidos, procedeu-se numa primeira fase, a uma exaustiva pesquisa bibliográfica assente, essencialmente, na problemática da gestão de resíduos, na utilização de geossintéticos em obras de carácter ambiental e em projeto e construção de aterros de resíduos.

As fontes utilizadas na pesquisa bibliográfica são, maioritariamente, provenientes de associações ambientais ou outro tipo de instituições fidedignas, tais como a APA, a EEA, a EPA ou o IGS.

Toda informação obtida na pesquisa bibliográfica efetuada foi complementada com informação adquirida aquando da realização do estágio na empresa responsável pela construção do aterro, uma vez que aí foi permitindo contactar com as problemáticas associadas à construção deste tipo de infraestrutura, bem como perceber o funcionamento e constituição do mesmo.

1.3. Estrutura

Estruturalmente, o presente trabalho encontra-se dividido em quatro capítulos.

No capítulo 1, designado de introdução, é feito um apanhado da evolução da produção e gestão de resíduos, e da constituição dos aterros de resíduos a nível mundial. É também apresentado, de forma mais pormenorizada, o caso da produção e gestão de resíduos em Portugal, e um ponto da situação relativamente às infraestruturas de tratamento e deposição de resíduos.

O capítulo 2, revisão bibliográfica, apresenta a legislação vigente para o setor dos resíduos em Portugal, dividindo-a em legislação relativa resíduos e aterros. Para além disto, é ainda realizada uma análise à proposta do novo Plano Estratégico para Resíduos Sólidos Urbanos e são definidos todos os princípios e conceitos referentes a aterros de resíduos.

No capítulo 3, intitulado de impermeabilização de aterros e drenagem de lixiviados, é relatado o contexto geológico e hidrogeológico do local de implementação da infraestrutura em estudo, bem como as propriedades e características dos lixiviados a produzir. Neste capítulo realiza-se também uma exposição relativa a tipos e funções de geossintéticos, a processos construtivos dos sistemas de impermeabilização, sistema de drenagem de lixiviados, sistema de monitorização de águas subterrâneas, e a processos de garantia da qualidade de construção. Este capítulo contempla, ainda, uma análise de custo às soluções aplicadas para o sistema de impermeabilização e drenagem de lixiviados, e a proposta uma solução alternativa.

O quarto capítulo, as conclusões, dão resposta aos objetivos inicialmente propostos, expõe as principais problemáticas verificadas, bem como as medidas implementadas para a sua resolução e são identificadas linhas para futuras pesquisas.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Legislação em vigor

Nas últimas décadas, o setor nacional dos resíduos evoluiu de forma significativa apresentando-se, hoje, bem estruturado e capacitado para uma correta aplicação de todos os princípios comunitários instaurados. Para se atingir este nível, houve a necessidade de uma tomada de consciência relativamente à preservação da saúde pública, da qualidade do meio ambiente e da proteção de solos e da qualidade dos recursos hídricos. Tal fato levou à implementação de instrumentos legais, de planeamento e económico-financeiros. Tais instrumentos implementaram um pacote legislativo referente à gestão de resíduos sob a forma de regulamentos, diretivas, decisões, recomendações e pareceres de aplicação obrigatória que, no caso de serem nacionais, para além da instauração de legislação referente a cada país, devem proceder à transposição das diretivas comunitárias.

Dado o tema do presente trabalho, o estudo da legislação irá focar-se apenas na legislação em vigor relativa a aterros e resíduos.

2.1.1. Legislação relativa a aterros

A legislação relativa a aterros tem por base a Diretiva n.º 1999/31/CE, do Conselho, de 26 de abril, designada também de Diretiva Aterro, que introduziu, entre outros, a definição de classes de aterros e resíduos, processos para a admissão de resíduos e condições para a correta implementação e concepção de aterros sanitários.

A constante evolução do setor dos resíduos levou à publicação do Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de agosto, que transpõe a Diretiva 1999/31/CE, do Conselho, de 26 de abril, alterada pelo Regulamento (CE) n.º 1882/2003, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 29 de setembro, e que aplica a Decisão n.º 2003/33/CE, do Conselho, de 19 de dezembro de 2002. Com a aplicação deste decreto foi revogado o Decreto-Lei n.º 152/2002 de 23 de maio.

2.1.1.1. Classes de aterros

De acordo com o DL n.º 183/2009, de 10 de agosto, os aterros são agrupados em três classes:

- Aterros para resíduos inertes¹;

¹ Como descrito no DL 178/2006, de 5 de setembro, trata-se de um tipo de resíduo “que não sofre transformações físicas, químicas ou biológicas importantes e, em consequência, não pode ser solúvel nem inflamável, nem ter qualquer outro tipo de reação física ou química, e não pode ser biodegradável, nem afetar

- Aterros para resíduos não perigosos²;
- Aterros para resíduos perigosos³.

O presente decreto define também o tipo de resíduos admitidos em cada classe de aterro. Assim sendo, é definido que, para aterros de resíduos inertes, são aceites os resíduos indicados na Tabela 6.

Tabela 6- Resíduos admitidos em aterros para resíduos inertes

Código LER	Descrição	Restrições
10 11 03	Resíduos de materiais fibrosos à base de vidro.....	Só sem aglutinantes orgânicos.
15 01 07	Embalagens de vidro.....	
17 01 01	Betão.....	Só RCD selecionados (*)
17 01 02	Tijolos.....	Só RCD selecionados (*)
17 01 03	Ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos.....	Só RCD selecionados (*)
17 01 07	Misturas de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos.	Só RCD selecionados (*)
17 02 02	Vidro.....	
17 05 04	Solos e rochas.....	Excluindo solo superficial e turfa; excluindo solo e rochas de locais contaminados
19 12 05	Vidro.....	
20 01 02	Vidro.....	Só vidro recolhido separadamente
20 02 02	Terras e pedras.....	Só de resíduos de jardins e parques, excluindo solo superficial e turfa

(*) São RCD (resíduos de construção e demolição) selecionados Fonte: DL n°183/2009 de 10 de agosto
Embora os resíduos indicados na tabela sejam, *a priori*, aceites, o seu destino final só é definido após ensaio de caracterização. Caso estes se apresentem contaminados ou contiverem outros materiais que não os previstos e, por isso, apresentem um risco associado no seu processo deposição, então deverão ser encaminhados para aterros de outra classe.

No caso de aterros para resíduos não perigosos, são admitidos, segundo o mesmo decreto:

negativamente outras substâncias com as quais entre em contato de forma susceptível de aumentar a poluição do ambiente, ou prejudicar a saúde humana, e cujas lixiviabilidade total, conteúdo poluente e ecotoxicidade do lixiviado são insignificantes e, em especial, não põem em perigo a qualidade das águas superficiais e ou subterrâneas”.

² “São todos os resíduos não abrangidos pela definição constante da alínea cc) do artigo 3.º do DL 178/2006, de 5 de setembro”.

³ “Resíduos que apresentam uma ou mais características de perigosidade para a saúde ou para o ambiente, nomeadamente os identificados como tal pela LER”.

- Resíduos urbanos⁴;
- Resíduos não perigosos de qualquer outra origem, que não necessitem de ensaios de caracterização básica, sendo classificados no capítulo 20 da Lista Europeia de Resíduos (LER), bem como frações de resíduos urbanos não perigosos recolhidos de forma seletiva e materiais não perigosos de outras origens;
- Resíduos perigosos estáveis, não reativos, nomeadamente os solidificados ou vitrificados.

No caso de aterros para resíduos perigosos só podem ser depositados resíduos perigosos que respeitem o descrito no artigo n.º 3 da parte B do anexo IV do DL 183/2009, de 10 de agosto, referente aos valores limites de lixiviação admitidos para resíduos granulares⁵ e monolíticos⁶.

Na deposição em aterros não devem ser admitidos, como refere o DL 183/2009, de 10 de agosto:

- “Resíduos líquidos”;
- “Resíduos que, nas condições de aterro, são explosivos, corrosivos, oxidantes, muito inflamáveis ou inflamáveis na aceção da LER”;
- “Resíduos hospitalares, de acordo com os critérios estabelecidos no plano específico de gestão de resíduos hospitalares”;
- “Pneus usados, com exceção de pneus usados como elementos de proteção em aterro e de pneus com diâmetro exterior superior a 1400 mm”.

É também expressamente proibida a diluição ou mistura de resíduos, de forma a que estes cumpram os critérios de admissão em aterro.

2.1.1.2. Licenciamento, construção e exploração de aterros

O Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de agosto instaura um novo processo de licenciamento, feito até então em duas fases, passando com estes para apenas uma, habilitando assim o operador à construção e exploração do aterro. Esta licença aplica-se à concepção, construção, exploração, encerramento e pós-encerramento do aterro. No caso de operações de modificação ou ampliação de um aterro, que sejam suscetíveis de produzir efeitos negativos significativos para pessoas e ambiente, ou que corresponda aos limiares

⁴ “Resíduo proveniente de habitações bem como outro resíduo que, pela sua natureza ou composição, seja semelhante ao resíduo proveniente de habitações”.

⁵ “Resíduos que não sejam monolíticos, líquidos ou lamas”.

⁶ “Materiais que apresentem características físicas e mecânicas que assegurem a sua integridade por um certo período de tempo”.

estabelecidos para aterros no anexo I do regime de prevenção e controlo integrados da poluição, aprovado pelo Decreto-lei n.º 127/2013 de 30 de agosto, é necessário proceder-se a um novo processo de licenciamento.

O pedido de licença para operação de deposição de resíduos em aterro, deverá ser feito por um requerente que cumpra todos os requisitos discriminados no artigo 13.º do Decreto-Lei n.º 183/2009 de 10 de agosto. O pedido desta licença deve ser apresentado pelo requerente à entidade licenciadora, devendo constar neste, os documentos de identificação do requerente, documentos comprovativos do cumprimento dos requisitos exigidos, projeto de execução e exploração da infraestrutura, cópia da declaração de impacto ambiental (DIA) favorável, favorável condicionada, ou o comprovativo da entrega do estudo de impacto ambiental junto da autoridade de AIA competente, cópia do parecer relativo à compatibilidade da localização da infraestrutura e apresentação de garantias financeiras. No caso de se tratarem de aterros sujeitos ao descrito no regime de prevenção e controlo integrados da poluição, aprovado pelo Decreto-lei n.º 127/2013 de 30 de agosto, o pedido da licença atrás referida, poderá ser apresentado através do formulário para o pedido de licença ambiental, designado por formulário PCIP.

O artigo n.º 14 do Decreto-Lei n.º 183/2009 estabelece as entidades responsáveis pelo licenciamento da deposição de resíduos em aterro, em função da sua classe. É da responsabilidade:

- Da APA, caso se tratem de aterros abrangidos pelo anexo I do regime jurídico da AIA, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 151-B/2013 de 31 de Outubro, alterado pelo Decreto-Lei n.º 47/2014;
- Das entidades de administração central, consideradas entidades coordenadoras no âmbito do artigo 9.º do regime de exercício da atividade industrial, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 209/2008, de 29 de outubro, no caso de aterros tecnicamente associados a estabelecimentos industriais e que se localizem dentro do perímetro do estabelecimento industrial em causa e se destine exclusivamente à deposição de resíduos produzidos nesse estabelecimento industrial e nos demais estabelecimentos pertencentes ao mesmo produtor.
- Das Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional (CCDR), nos restantes casos.

A avaliação de impacto ambiental é um instrumento que assume grande importância na política do ambiente e ordenamento do território, constituindo uma forma de promover o desenvolvimento sustentável e uma proteção da qualidade do ambiente, nomeadamente na gestão de recursos hídricos. A AIA tem repercussão nos projetos públicos e privados,

abrangendo, no âmbito deste trabalho, aterros de resíduos urbanos e de outros resíduos não perigosos, com exceção de aterros destinados a resíduos inertes, que recebam mais de 10 t/dia ou com capacidade total superior a 25000 t e instalações destinadas a operações de eliminação de resíduos perigosos que realizem operações de deposição em Aterro (D1), com capacidade superior a 10 t/dia.

Nos casos de infraestruturas de gestão e tratamento de resíduos atrás enumerados, a entrega do pedido de licença para operação de deposição de resíduos em aterro só é entregue após:

- A emissão de DIA favorável ou condicionalmente favorável, caso o procedimento de AIA decorra na fase de projeto de execução;
- Emissão de parecer relativo à conformidade do projeto de execução com a DIA, no caso do processo de AIA decorra na fase de estudo prévio;
- Emissão de declaração relativa à dispensa do procedimento de AIA;
- O decurso do prazo necessário para deferimento tácito nos termos previstos no regime jurídico de AIA.

Caso o operador pretenda, e o faça relativamente a um projeto de execução, o processo de licenciamento da operação de deposição de resíduos em aterro pode acontecer em simultâneo com o processo de AIA, iniciando-se o licenciamento logo após a emissão da declaração de conformidade do EIA, como estabelecido no n.º4 do artigo 13.º do regime jurídico da AIA, publicado pelo Decreto-Lei n.º 151-B/2013 de 31 de outubro, alterado pelo Decreto-Lei n.º 47/2014 de 24 de março, que veio revogar o Decreto-Lei n.º 69/2000 de 3 de maio, e as alterações a este feitas pelo Decreto-Lei n.º 197/2005 de 8 de novembro. No prazo de cinco dias após a instrução do pedido de licenciamento, a entidade licenciadora promove a consulta das entidades públicas, que nos termos da lei se devem pronunciar sobre este. As entidades solicitadas, a administração da região hidrográfica (ARH) e CCDR territorialmente competente, o delegado de saúde regional e a Autoridade para as Condições do Trabalho (ACT), devem pronunciar-se num prazo máximo de 20 dias após a recessão de todos os elementos do processo, remetidos pela entidade licenciadora. No caso de omissão por partes destas entidades, considera-se o parecer favorável.

A comunicação ao requerente da aprovação do projeto de execução e de exploração do aterro é feita num prazo de 30 dias após o termo do tempo estabelecido para as entidades consultadas emitirem o seu parecer.

Após a conclusão da construção do aterro, o requerente solicita a realização de uma vistoria, devendo esta ser feita com uma antecedência de 40 dias relativamente à data

prevista de entrada em funcionamento da infraestrutura. Feita a vistoria, é emitida, num prazo de 10 dias, a decisão final sobre o licenciamento da operação de deposição de resíduos em aterro.

Concluído este processo e iniciada a fase de exploração, o operador fica obrigado nos termos do artigo 40.º do Decreto-Lei 183/2009 de 10 de agosto a:

- Executar o programa de acompanhamento e controlo fixado no alvará de licença para a operação de deposição de resíduos em aterro;
- Adotar medidas de prevenção da poluição de acordo com as melhores técnicas possíveis;
- Notificar a entidade licenciadora e a Inspeção-Geral do Ambiente e do Ordenamento do Território (IGAOT), no prazo de 48 horas após a verificação de ocorrências de efeitos negativos sobre o ambiente;
- Executar o programa de medidas corretivas dos efeitos negativos sobre o ambiente;
- Garantir as análises necessárias à verificação da admissibilidade dos resíduos em aterro e às operações de acompanhamento e controlo da exploração.

2.1.1.3. Encerramento e pós-encerramento

Atingida a capacidade de armazenamento do aterro, termina a fase de exploração, procedendo-se então ao encerramento do mesmo, não deixando o operador de ter obrigações, nomeadamente as indicadas no artigo 42.º do Decreto-Lei n.º 183/2009 de 10 de agosto:

- Obrigação da execução de manutenção e controlo do aterro;
- Adoção de medidas de prevenção da poluição;
- Comunicação às entidades competentes caso ocorram acidentes com efeitos prejudiciais para o ambiente;
- Cumprimento das medidas corretivas desses efeitos

De forma a tornar mais perceptível o quadro legislativo a que um aterro sanitário deve obedecer, a Tabela 7 apresenta um resumo normativo, especificando os objetivos da sua aplicação.

Tabela 7- Resumo normativo referente a aterros sanitários.

Legislação	Objetivo
Decreto-Lei n.º 47/2014, de 24 de Março	Procede à primeira alteração ao Decreto-Lei n.º 151-B/2013, de 31 de outubro, nomeadamente dos artigos 1.º, 4.º, 8.º, 13.º, 23.º, 26.º, 31.º, 45.º, e 50.º.
Decreto-Lei n.º 151-B/2013, de 31 de outubro	Estabelece o regime jurídico da avaliação de impacto ambiental dos projetos públicos e privados e transpõe a Diretiva n.º 2011/92/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 13 de dezembro de 2011.
Decreto-Lei n.º 127/2013, de 30 de agosto	Estabelece o regime de emissões industriais aplicável à prevenção e ao controlo integrados da poluição, bem como as regras destinadas a evitar e ou reduzir as emissões para o ar, a água e o solo e a produção de resíduos, a fim de alcançar um elevado nível de proteção do ambiente no seu todo, e transpõe a Diretiva n.º 2010/75/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 24 de novembro de 2010, relativa às emissões industriais (prevenção e controlo integrados da poluição).
Decreto-Lei n.º 88/2013, de 9 de junho	Procede à segunda alteração do Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de agosto, relativamente aos critérios de armazenagem de mercúrio metálico considerado resíduo.
Decreto-Lei n.º 84/2011, de 20 de junho	Procede à primeira alteração ao Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de agosto, nomeadamente dos artigos 12º, 13º, 24º e 52º.
Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de agosto	Estabelece o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e os requisitos gerais para a concepção, construção, exploração, encerramento e pós-encerramento de aterros.
Decreto-Lei n.º 209/2008, de 29 de outubro	Estabelece o regime de exercício da atividade industrial (REAI).

2.1.2. Legislação relativa a resíduos

A legislação relativa a resíduos tem como base a Diretiva 2006/12/CE, revista pela Diretiva 2008/98/CE, também designada por Diretiva Quadro-Resíduos (DQR), que atende aos objetivos apresentados no 6º programa Comunitário de Ação em Matéria de Ambiente, definindo uma série de conceitos como valorização, eliminação e reciclagem de resíduos, e estabelece uma hierarquia para a gestão de resíduos. A transposição da Diretiva 2008/98/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de novembro, é feita

pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho, que vem alterar o Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de setembro, e implementar o atual regime de gestão de resíduos em Portugal. Com a publicação deste decreto, o Governo pretende reforçar a ideia da necessidade de prevenção da produção de resíduos e estimular reutilização e reciclagem nomeadamente de resíduos biodegradáveis.

Segundo o decreto referido, entende-se como resíduos, “quaisquer substâncias ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem intenção ou a obrigação de se desfazer”, podendo estes ser classificados como, resíduos de construção e demolição, industriais, agrícolas, hospitalares, inertes, perigosos e urbanos. A classificação de resíduos é feita de forma mais detalhada através da Portaria n.º 209/2004, de 3 de março, onde é publicada a Lista Europeia de Resíduos (LER). Nesta lista, os tipos de resíduos são identificados através de um código de 6 dígitos, sendo que caso se tratem de resíduos considerados perigosos, para além do código é acrescentado um (*). Na presente portaria, são, ainda, definidas as características de perigosidade atribuídas aos resíduos e enumeradas as operações de eliminação e valorização de resíduos, tendo estas sido revistas e republicadas pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho.

A hierarquia para a gestão de resíduos estabelecida na Diretiva 2008/98/CE, transposta para o regime nacional pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho, estabelece que a primeira fase da gestão de resíduos deve passar pela prevenção e redução da sua produção, depois passar pela preparação para reutilização, seguida da reciclagem e outros tipos de valorização, como a valorização energética, e por fim em último caso, proceder a sua eliminação, como é o caso da deposição em aterro.

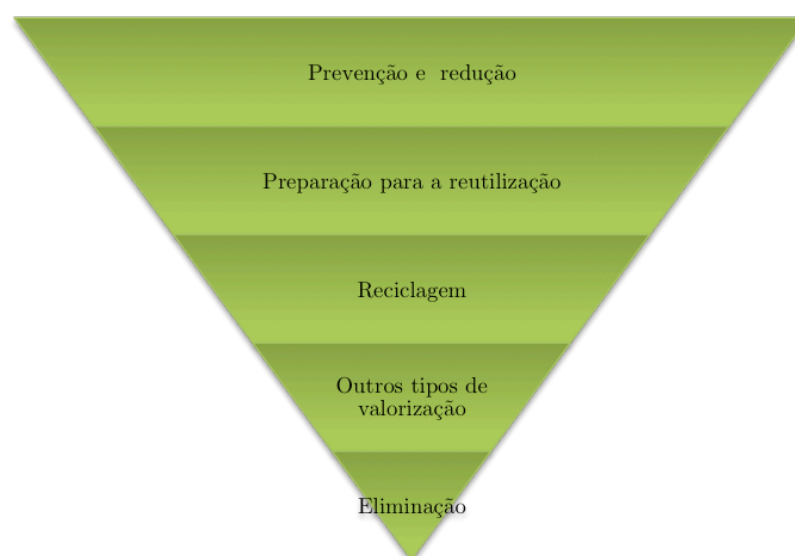


Figura 4 - Hierarquia dos resíduos (adaptado de (Figueiredo, 2013)).

Para além destes princípios, o Decreto-Lei n.º 73/2011 surge também com o objetivo de:

- Aprovar programas de prevenção e estabelecer metas de reutilização, reciclagem e outras formas de valorização de resíduos para o ano horizonte de 2020;
- Alargar o âmbito do mercado organizado de resíduos, potencializando e facilitando a valorização de resíduos de outros resíduos;
- Adoptar medidas de simplificação administrativa, ao isentar de licenciamento um conjunto de atividades especiais de valorização de resíduos;
- Alargar, em matéria de registo, o sistema integrado de registo eletrónico de resíduos integrado no Sistema Integrado de Registo da Agencia Portuguesa do Ambiente (SIRAPA);
- Introduzir um mecanismo de responsabilidade alargado ao produtor;
- Introduzir a guia eletrónica (e-GAR) de acompanhamento de resíduos, que vem simplificar o processo de registo e controlo da informação na atividade de transporte de resíduos;
- Introduzir modificações na operação de mistura de resíduos perigosos, para o caso particular de óleos usados.

Para além da legislação já descrita, são apresentadas na Tabela 8 outras normas que, embora não assumam relevância para o presente trabalho, se assumem importantes para os setores dos resíduos.

Tabela 8- Resumo da legislação aplicada a resíduos.

Legislação	Objetivo
Decreto-Lei n.º 110/2013, de 2 de agosto	Procede à quinta alteração ao Decreto-Lei n.º 366-A/97, de 20 de dezembro, alterado pelos Decretos-Leis n.º 162/2000, de 27 de julho, 92/2006, de 25 de maio, 178/2006, de 5 de setembro, e 73/2011, de 17 de junho, e transpõe para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 2013/2/UE, da Comissão, de 7 de fevereiro de 2013, que altera o anexo I à Diretiva n.º 94/62/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 20 de dezembro
Decreto-Lei n.º 23/2013, de 15 de fevereiro	Procede à primeira alteração ao Decreto-Lei n.º 45/2008, de 11 de março, introduzindo procedimentos desmaterializados de envio das notificações e informações relativas às transferências de resíduos.

Decreto-Lei n.º 73/2011, de 7 de junho	Procede à alteração do regime geral da gestão de resíduos, publicado pelo Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de setembro, republicando este com as respetivas alterações e transpõe a Diretiva n.º 2008/98/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de novembro.
Despacho n.º 3227/2010, de 22 de fevereiro	Aprova o Programa de Prevenção de Resíduos Urbanos (PPRU) para o período de 2009-2016.
Portaria n.º 172/2009, de 17 de agosto	Aprova o Regulamento dos Centros Integrados de Recuperação, Valorização e Eliminação de Resíduos Perigosos (CIRVER).
Decreto-Lei n.º 46/2008, de 12 de março	Aprova o regime da gestão de resíduos de construção e demolição.
Decreto -Lei n.º 45/2008, de 11 de março	Visa assegurar a execução e garantir o cumprimento, na ordem jurídica interna, do Regulamento (CE) n.º 1013/2006, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 14 de junho de 2006, alterado pelo Regulamento (CE) n.º 1379/2007, da Comissão, de 26 de novembro de 2007, e pelo Regulamento (CE) n.º 669/2008, da Comissão, de 15 de julho de 2008, relativo à transferência de resíduos.
Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de setembro	Estabelece o regime geral da gestão de resíduos e transpõe a Diretiva 2006/12/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de Abril.
Portaria n.º 209/2004, de 3 de maio	Procede à publicação da Lista Europeia de Resíduos, estabelece as características de perigosidade associadas aos resíduos e as operações de valorização e eliminação destes.
Despacho Conjunto dos Ministérios do Ambiente e Saúde n.º761/99, de 31 de agosto	Aprova o Plano Estratégico dos Resíduos Hospitalares (PERH).

2.1.3. Plano Estratégico para Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU 2020)

A intensa exploração de recursos naturais nas últimas décadas tem revelado graves consequências em termos ambientais, sociais e económicos. Os impactos resultantes desta atividade, bem como a escassez de recursos, proporcionaram uma mudança de paradigma na sociedade, levando a uma maior preocupação com a sustentabilidade ambiental, económica e social dos países.

A preocupação com a sustentabilidade ambiental recai, em parte, sobre os resíduos e a sua utilização como recurso (matéria). A definição da utilização dos resíduos como recursos está presente nas iniciativas estratégicas, Estratégia Europa 2020 e Roteiro para uma Europa eficiente na Utilização de Resíduos, recentemente publicadas para a União Europeia e no 7.º Programa de Ação em Matéria do Ambiente da UE. Este último dá

grande importância à gestão eficiente de recursos, adotando os objetivos do Roteiro para a Eficiência de Recursos.

A introdução do conceito de resíduo como recurso implica uma reorganização da estratégica relativa a resíduos, essencialmente a nível de processos, tecnologias e infraestruturas, tendo sempre subjacente o objetivo da garantia da proteção ambiental e da saúde pública.

Em meados de 2013, o Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia publicou a proposta de um novo Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos, denominado de PERSU 2020. Este novo plano proposto irá enquadrar a atividade do setor nos próximos anos, inserindo-se na Estratégia Europa 2020, onde se defende uma economia eficiente na utilização sustentável de recursos.

O PERSU 2020 surge após a avaliação do desempenho do seu antecessor, o PERSU II. A implementação do PERSU II provocou, no período de 2007-2012, inúmeras modificações no setor da gestão de resíduos urbanos. Exemplos do descrito são:

- A alteração da configuração dos sistemas de gestão de resíduos, bem como as opções de gestão dos mesmos;
- O aumento do número de estações de tratamento mecânico e biológico (TMB), que proporcionou um aumento da valorização orgânica e a reciclagem de RU e uma melhoria da rede de recolha seletiva;
- O fortalecimento da hierarquia de gestão de resíduos, dirigindo a sociedade para uma consciencialização da política de reciclagem e valorização orgânica de resíduos biodegradáveis.

No entanto, estas modificações implantadas mostraram-se insuficientes, pois após uma avaliação da aplicação do PERSU II em 2012, verificou-se um desvio significativo relativamente às metas estabelecidas no mesmo. Este desvio é particularmente acentuado no que respeita à valorização de RUB, nomeadamente através do seu destino final, que continua a ser maioritariamente a deposição direta em aterro. Este desvio pode, no entanto, ser explicado pelo atraso da entrada em funcionamento das novas linhas de exploração e por problemas na implantação da recolha seletiva. Outro aspeto onde é verificado um desvio considerável, é na reciclagem e na valorização de embalagens.

Posto isto, torna-se fundamental que a aplicação do novo PERSU se foque no resíduo como recurso e numa política de eliminação progressiva da atividade de deposição direta em aterro de RUB.

A elaboração do novo PERSU surge como resposta a algumas alterações sofridas no setor, nomeadamente:

- A alteração no número de sistema de gestão de RU e no seu agrupamento, nomeadamente em relação à gestão de RUB;
- A alteração das metas comunitárias de desvio de RUB de aterro relativas a 2009 e 2016, para 2013 a 2020 ;
- A integração e atualização do Programa de Prevenção de Resíduos Urbanos (PPRU);
- A instauração de uma nova meta comunitária para a reutilização e reciclagem para o ano de 2020, prevista na Diretiva n.º2008/98/CE e no Decreto-lei n.º 178/2006, de 5 de setembro, alterado e republicado pelo Decreto-lei n.º73/2011, de 17 de junho;
- O novo quadro financeiro plurianual da União Europeia para 2012-2020;
- A regularização da classificação qualitativa do composto e eventuais procedimentos de processos de aplicação do fim do estatuto de resíduo aos combustíveis derivados de resíduos (CDR) provenientes de RU;
- A necessidade de garantir o valor económico dos subprodutos e rejeitados das instalações de tratamento de resíduos urbanos, nomeadamente do composto e dos CDR;
- Os desafios e dificuldades ao nível da sustentabilidade económico-financeira das entidades gestoras.

O PERSU 2020 define objetivos, metas globais e metas específicas para os Sistemas de Gestão de RU, bem como as medidas a implementar no quadro de gestão de RU para o período de 2014-2020, tendo em consideração, também, a estratégia que serve de suporte a sua execução. Assim sendo, é notória a importância deste plano para o cumprimento das metas nacionais e comunitárias.

O âmbito deste plano abrange, essencialmente, os resíduos urbanos que sejam responsabilidade dos Sistemas de Gestão de RU, restringindo-se, apenas, a Portugal Continental. As metas e objetivos definidos para o cumprimento das metas nacionais, embora se apliquem a Portugal Continental apenas, contabilizam, também, o contributo das Regiões Autónomas da Madeira e Açores.

O novo plano estratégico define oito objetivos de forma a fundamentar a implantação de medidas e o estabelecimento de metas para o período de ação a que se destina. Estes objetivos são:

- Prevenir a produção e perigosidade dos RU;
- Aumentar a preparação para reutilização, da reciclagem e qualidade dos recicláveis;
- Proporcionar uma redução da deposição de RU em aterros;

- Assegurar a valorização económica e escoamento dos recicláveis e subprodutos do tratamento de RU;
- Reforçar os instrumentos económico-financeiros;
- Aumentar a eficácia e capacidade institucional e operacional do setor;
- Reforçar a investigação, o desenvolvimento tecnológico, inovação e a internacionalização do setor;
- Aumentar o contributo do setor para outras estratégias e planos nacionais.

As metas preconizadas no PERSU 2020, podem ser divididas em metas nacionais e por sistema de gestão de RU. As metas nacionais visam os oito objetivos atrás referidos.

Prevenção da produção e perigosidade dos RU

Para a prevenção da produção e perigosidade dos RU, o PERSU 2020 define como meta, para o ano de 2016, uma redução mínima da produção de resíduos de 7,6% em peso por habitante, tendo em consideração como valor de referencia o valor verificado em 2012. Define, ainda, e também para o ano de 2020, que este valor atinja os 10% em peso por habitante, tendo, igualmente, como valor de referencia o valor de 2012.

Preparação para reutilização e reciclagem

Relativamente à preparação para reutilização e reciclagem, o PERSU 2020 estabelece uma meta que pretende um aumento mínimo global de 50% em reutilização e reciclagem de resíduos urbanos, incluindo o papel, o cartão, o plástico, o vidro, o metal, a madeira e os resíduos urbanos biodegradáveis, para o ano horizonte de 2020.

Redução da deposição de RUB em aterros

A deposição de RUB em aterros deve ser reduzida para 35% da quantidade total, em peso, dos resíduos urbanos biodegradáveis produzidos em 1995.

Reciclagem de Resíduos de Embalagem

Esta meta estabelece que, para o para o ano horizonte de 2020, deve ser garantida a reciclagem de, no mínimo, 70% em peso dos resíduos de embalagens.

A implementação de metas por sistema de gestão de resíduos, visa responsabilizar os decisores pela escolha de tecnologias que permitam alcançar as metas definidas. As metas preconizadas a nível dos sistemas de gestão são:

- Preparação para reutilização e reciclagem;
- Deposição de RUB em aterro;
- Retomas de materiais com origem em recolha seletiva.

Os valores para as metas acima descritas, em relação a cada sistema de gestão, são apresentados na Tabela 9.

De forma a que se cumpram estas metas, o PERSU define, para os sistemas de gestão de resíduos, prioridades de ação como:

- O aumento da recolha seletiva;
- O aumento das eficiências nos processos de triagem e tratamento mecânico;
- O aumento da capacidade de valorização orgânica.

A definição destas prioridades e a sua aplicação requer, naturalmente, um investimento, que se prevê avultado. Na Tabela 9 são apresentados os valores estimados para responder as estas prioridades

Tabela 9-Metas por sistema de gestão de RU em Portugal Continental para 2020 (MAOTE, 2013).

Sistema de Gestão	Meta Mínimo de Preparação para Reutilização e Reciclagem (% de RU Recicláveis)	Meta Máxima Deposição RUB em aterro (% de RUB produzidos)	Meta de Retomas de Recolha Seletiva (kg per capita por ano)
ALGAR	52%	46%	71
AMARSUL	48%	34%	45
AMBILITAL	80%	10%	48
AMBISOUSA	35%	50%	32
AMCAL	80%	10%	55
ECOBEIRÃO	80%	10%	29
BRAVAL	80%	10%	53
ECOLEZÍRIA	35%	50%	30
ERSUC	80%	10%	46
GESAMB	80%	10%	48
LIPOR	35%	10%	50
RESIALENTEJO	80%	10%	43
RESÍDUOS DO NORDESTE	80%	10%	42
RESIESTRELA	80%	10%	30
RESINORTE	58%	43%	41
RESITEJO	35%	10%	52
RESULIMA	80%	10%	45
SULDOURO	39%	50%	45
TRATOLIXO	53%	16%	49
VALNOR	80%	10%	54
VALORLIS	55%	42%	42
VALORMINHO	35%	50%	47
VALORSUL	42%	10%	49
TOTAL	53%	26%	47

Tabela 10 - Investimento previsto para as prioridades definidas no PERSU 2020 (MAOTE, 2013)

Prioridades PERSU 2020	Valor estimado (M€)
Aumento das retomas de recicláveis por recolha seletiva	120
Aumento da eficiência e da produtividade das instalações existentes	50
Conversão de instalações existentes: adaptação de TMs em TMBs e novas infraestruturas de preparação para a reutilização e reciclagem de resíduos urbanos, incluindo valorização orgânica	90
Outras medidas (I&D, projetos piloto, capacitação, estudos, escoamento de subprodutos, como o biogás)	60
Total	320

O plano de ação do PERSU define oito eixos de atuação, de forma a que se garanta o cumprimento dos objetivos e metas estabelecidas. Os eixos de atuação passam então por:

- Prevenir a produção e perigosidade dos resíduos, passando este ponto pela revisão do Programa de Prevenção de Resíduos (PPRU);
- Aumentar a reciclagem e a quantidade de recicláveis, dando particular atenção à atuação a montante da cadeia de gestão de RU;
- Reduzir a deposição de resíduos em aterros recorrendo a um aumento da eficiência dos processos e da capacidade de tratamento;
- Proporcionar uma valorização económica e o escoamento dos recicláveis subprodutos do tratamento dos RU;
- Definir instrumento económico-financeiros de incentivo ao desvio de aterro e à reciclagem, se forma a seguram a sustentabilidade dos sistemas e acessibilidade económica ao serviço;
- Melhorar a eficácia e a capacidade institucional e operacional do setor, assegurando sustentabilidade dos agentes;
- Reforçar a investigação, investigação, desenvolvimento tecnológico, inovação e internacionalização do setor;
- Contribuição do setor para outras estratégias nacionais e planos do setor.

O novo PERSU pretende, essencialmente, assegurar o cumprimento das metas nacionais e comunitárias, impondo apenas objetivos, pondo de parte a imposição de soluções. Uma avaliação mais cuidada da proposta do novo PERSU, demonstra algumas debilidades e lacunas relativamente as metas e objetivos nele descritos. Exemplo disso é a proposta para o aumento das retomas de recicláveis por recolha seletiva, que fixa uma média anual de 47 kg/hab/ano que, para o ano horizonte de 2020, representará uma taxa de recolha de 18%. Este valor, comparativamente a países como Itália ou Inglaterra, revela-se anormalmente

baixo, pois estes países apresentam taxas de 45% e 38% respetivamente, já no ano de 2010.

Outro aspeto que não é devidamente enfatizado diz respeito às metas para a entrada de resíduos não tratados em aterro. O PERSU 2020 deveria implementar, à semelhança de outros países, uma política de proibição desta prática, ou a aplicação de uma taxa de gestão de resíduos (TGR) elevada, com um âmbito de aplicação a resíduos depositados em aterro ou encaminhados para incineração. Tais práticas deverão ser progressivamente consideradas impraticáveis, sendo consideradas como alternativa a reciclagem, nomeadamente através da redução e separação de resíduos, e a sua reutilização. De fato, práticas que promovam a redução e separação de resíduos devem ser facilitadas aos cidadãos, fazendo mais próximos dos cidadãos os pontos de recolha seletiva (ecopontos), e adequando os tarifários às praticas dos utilizadores.

Ainda referente à proposta para o novo plano, deveria ser previsto um investimento na sensibilização, separação de resíduos na fonte, sistemas de tarifários e recolha porta a porta, por parte dos municípios aos seus munícipes, devendo para tal prever-se um reforço financeiro de apoio.

As câmaras municipais devem proceder ao tratamento de resíduos verdes, em unidades próprias de compostagem, sempre que tal atividade seja comportável em termos económicos. De fato, a promoção da compostagem seria bastante vantajosa, nomeadamente a compostagem doméstica, que levaria a uma diminuição da produção de resíduos, apresentando também vantagens económicas, relativamente à não necessidade de recolha e tratamento posterior. Os tarifários aplicados aos resíduos devem beneficiar os utilizadores que recorram a este tipo de prática, devendo a tarifa ser reduzida.

Outra fragilidade do novo PERSU, prende-se com a recolha de resíduos urbanos perigosos em pequenas quantidades. Como acontece em inúmeros países, o novo plano deveria propor uma forma de recolha para este tipo de resíduos.

O PERSU 2020, não apresenta também uma solução para a quantidade excessiva de sacos de plásticos consumidos no país anualmente, nem um objetivo para a recolha de Monos.

3. Drenagem de lixiviados e impermeabilização de aterros

3.1. Lixiviados

Os resíduos sólidos depositados em aterros decompõem-se pela combinação de processos físicos, químicos e biológicos. Este processo de decomposição resulta na produção de produtos sólidos, líquidos e gasosos, dos quais importa conhecer a quantidade e constituição de forma a se proceder a um correto dimensionamento dos sistemas de recolha, proteção e tratamento (McBean, Rovers, & Farquhar, 1995).

Os lixiviados, fração líquida resultante do processo de decomposição, ocorrem como consequência da percolação de água ou outro líquido através dos resíduos depositados. No projeto de um aterro sanitário, a maior preocupação a ter, deverá ser o controlo dos lixiviados, relativamente a produção, contaminação, recolha e tratamento (Rhyner, Schwartz, Wenger, & Kohrell, 1990).

3.1.1. Produção de lixiviado: quantificação

A quantidade de lixiviado produzido durante o período de funcionamento do aterro e mesmo após o seu encerramento é um fator de extrema importância para a gestão de um aterro sanitário. Esta quantidade é consequência direta de fatores tais como a precipitação, a temperatura, o escoamento superficial e a infiltração de águas subterrâneas, e a idade do aterro. Grande parte da quantidade de lixiviado deve-se à precipitação caída sobre a zona de implementação da infraestrutura (Rhyner, Schwartz, Wenger, & Kohrell, 1990). Esta água precipitada pode ter vários fins como, a infiltração nos resíduos, a retenção à superfície, sendo evaporada posteriormente, ou a formação de escoamento superficial. A fração correspondente ao escoamento superficial é influenciada pelo tipo de solo e de vegetação, e a frequência e duração da precipitação (Shah, 2000).

Outros fatores importante que contribuem para a quantidade de lixiviados produzida são a humidade e a capacidade de campo dos resíduos (Shah, 2000). A capacidade de campo não é mais do que o volume máximo de água que os resíduos são capazes de reter sem que ocorra percolação da mesma, atingindo esta normalmente o seu limite entre 1 e 2 anos após o início da deposição dos resíduos. Atingida a capacidade de campo, as grandes variações da produção de lixiviados são verificadas de forma mais significativa apenas sazonalmente, devido às diferentes taxas de infiltração/percolação, em resposta as condições climatológicas (McBean, Rovers, & Farquhar, 1995).

A estimativa de cálculo da quantidade de lixiviado produzida pode ser feita com recurso ao balanço hídrico do aterro. Assim sendo, a estimativa da quantidade de água que se infiltra é encarada como a diferença entre a água recebida pelo local, por precipitação, águas superficiais e subterrâneas, e a evaporação (Rhyner, Schwartz, Wenger, & Kohrell, 1990). No entanto pelas características que os aterros apresentam atualmente, pode considerar-se apenas como entradas para a produção de lixiviado a precipitação e a humidade contida nos resíduos, sendo ignorado o escoamento superficial e infiltrações de águas subterrâneas, devido ao sistema de impermeabilização e aos sistemas de drenagem na zona envolvente da célula de deposição. A evaporação pode, em muitos casos, ser ignorada, caso a massa de resíduos seja sujeita a uma cobertura diária.

3.1.2. Características dos lixiviados

A principal preocupação ambiental na construção e operação de um aterro sanitário passa não só pela quantidade de lixiviados produzidos, mas também pelo perigo de vazamento destes através do aterro, associada à sua constituição.

A composição dos lixiviados depende de diversos fatores tais como o tipo e quantidade de resíduos, a idade do aterro, a humidade, a altura da massa de resíduos e a temperatura (Shah, 2000).

A heterogeneidade e composição dos resíduos influencia a constituição final dos lixiviados. Em aterros para resíduos inertes, os lixiviados produzidos caracterizam-se por baixa concentração de componentes, enquanto que os aterros para resíduos perigosos os lixiviados apresentam uma concentração altamente variável de componentes tais como sais, componentes orgânicos halogenados e metais. Em aterros destinados a resíduos não perigosos, as características do lixiviado podem variar em função das quantidades de matéria orgânica presente. A decomposição desta matéria pode implicar uma mudança no ambiente químico do aterro, dando origem a gases, tais como metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), água e outros sólidos solúveis (Shah, 2000).

A idade do aterro afeta a constituição dos lixiviados, sendo notório, por exemplo, na concentração da carência bioquímica de oxigénio (CBO), que diminui à medida que o período de estabilização biológica aumenta. Em aterros novos, a constituição dos lixiviados é fortemente marcada pela presença de matéria orgânica facilmente biodegradável e tendem a ser ácidos, com pH na ordem dos 6 e 7. Em aterros com idade superior a 4/5 anos o pH aumenta para uma gama entre 7 e 8. Esta variação surge como resposta ao esgotamento dos compostos orgânicos biodegradáveis e a produção de gases (McBean, Rovers, & Farquhar, 1995).

A altura da massa de resíduos tem também influência direta na constituição do lixiviado, sendo que quanto maior for a altura dos resíduos maior será o tempo que a água leva a percolar através destes, aumentando o limite líquido de solubilidade da água. Por último, outro fator que influencia a composição do lixiviado é a temperatura. Esta afeta a decomposição dos resíduos pois aumenta a atividade e desenvolvimento da atividade bacteriana. A atividade bacteriana ótima corre com temperaturas entre 30°C e 40°C. Temperaturas altas aumentam a solubilidade dos sais e a taxa de reações químicas (Shah, 2000).

Os lixiviados produzidos num aterro de resíduos após a sua formação são recolhidos e enviados para tratamento. O tratamento depende não só das características destes, mas também da forma como é feita a sua descarga, podendo ser em linha de água ou na rede de drenagem municipal. No caso em estudo, a descarga é feita na rede municipal, sendo esta mais vantajosa economicamente, pois não exige um tratamento completo do lixiviado, ao contrário da descarga feita diretamente em linhas de água.

Dada a importância da constituição dos lixiviados, apresenta-se na Tabela 11, a constituição típica de lixiviados em aterros para resíduos não perigosos.

Tabela 11 – Constituição típica de lixiviados em aterros não perigosos

Parâmetro	Exploração recente (inferior a 2 anos)		Exploração prolongada (superior a 10 anos)
	Intervalo (mg/L)	Valor típico (mg/L)	Intervalo (mg/L)
pH	4,5-7,5	6,0	6,6-7,5
CBO5	2.000-30.000	10.000	100-200
COT	1.500-20.000	6.000	80-160
CQO	3.000-60.000	18.000	100-500
SST	200-2.000	500	100-400
Azoto orgânico	10-800	200	80-120
NH4+	10-800	200	20-40
NO3-	5-40	25	5-10
Fósforo total	5-100	30	5-10

3.2. Impermeabilização de aterros

3.2.1. Tipos de geossintéticos

Segundo a Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS), define-se geossintético como sendo um material plano, fabricado a partir de polímeros, naturais ou sintéticos, utilizado em contato com o solo ou outros materiais em obras de engenharia.

Os geossintéticos surgem na década de 40, com o aparecimento dos primeiros polímeros sintéticos. Inicialmente, os geossintéticos eram produzidos apenas geotêxteis tecidos (década de 50), resultantes de uma conversão da indústria têxtil. Posteriormente, décadas

de 60 e 70, surgem, respetivamente, os geotêxteis não tecidos e os geotêxteis não tecidos agulhados. O sucesso aliado ao constante desenvolvimento do mercado nesta área, levou ao aparecimento, na década de 80, de novos tipos de geossintéticos, nomeadamente geogrelhas, georredes, geomembranas, geocompósitos entre outros (Lopes & Lopes, 2010).

Em Portugal, a utilização de geossintéticos começa a ser visível a partir da década de 80, nomeadamente em obras hidráulicas e viárias. No entanto, só a partir da década de 90 se verifica um crescimento considerável da utilização e procura de conhecimento relativamente aos geossintéticos. Tal fato deveu-se, essencialmente, à construção da rede nacional de aterros de resíduos urbanos. Dado o crescente interesse neste tipo de materiais, foi criada em 2002 a Comissão Portuguesa de Geossintéticos (IGS-Portugal) (Carneiro, 2009).

Atualmente, existem no mercado vários tipos de geossintéticos. A diferenciação entre os vários tipos ocorre, essencialmente, devido ao seu processo de fabrico. Assim sendo, podem ser encontrados materiais essencialmente de dois tipos: permeáveis e impermeáveis (ou barreiras). Como geossintéticos permeáveis consideram-se geotêxteis, geogrelhas, georredes, geocolções, geocélulas e geocompósitos drenantes. Materiais como geomembranas ou geocompósitos bentoníticos são considerados barreiras/geossintéticos impermeáveis. Os geocompósitos mencionados têm esta designação, pois são constituídos pela combinação de dois ou mais tipos de geossintéticos.

A Figura 5 ilustra de forma mais clara a classificação dos geossintéticos atrás descrita.

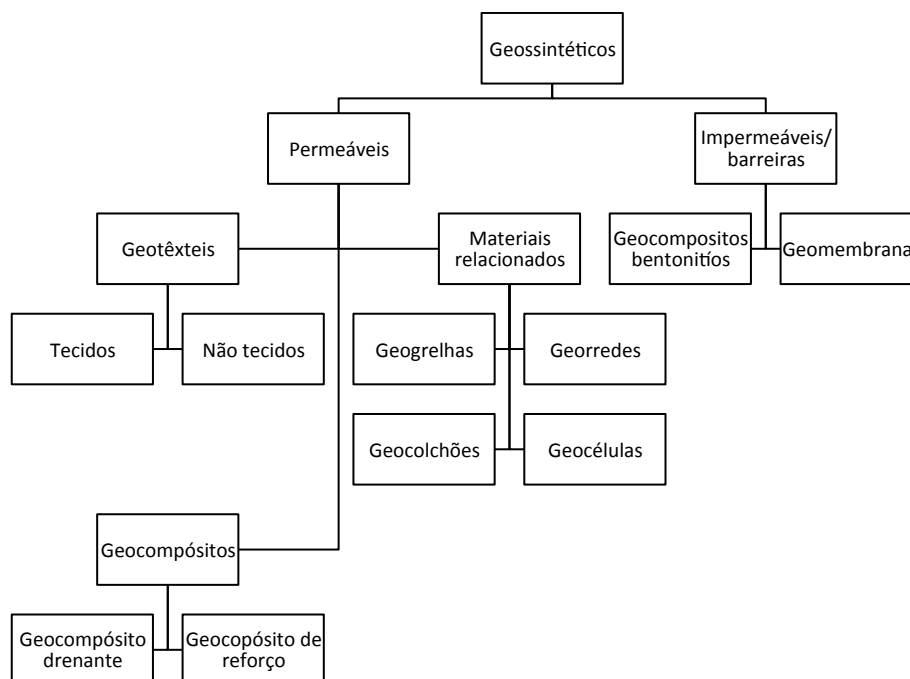


Figura 5 – Classificação de geossintéticos de acordo com a EN ISO 10318:2005

A grande diversidade de geossintéticos existente está diretamente associada à grande versatilidade deste tipo de materiais, podendo estes assumir diversas funções. Esta versatilidade está diretamente relacionada com a sua composição. A diversidade e versatilidade de geossintéticos pode comprometer o seu dimensionamento e utilização. De forma a que tal não aconteça, deve inicialmente definir-se as funções associadas a cada tipo de geossintético e hierarquiza-las, de forma a que posteriormente se escolha o mais indicado para o tipo de funções a que se destina.

As funções desempenhadas pelos geossintéticos são essencialmente cinco:

- Separação;
- Filtragem;
- Drenagem;
- Reforço;
- Proteção.

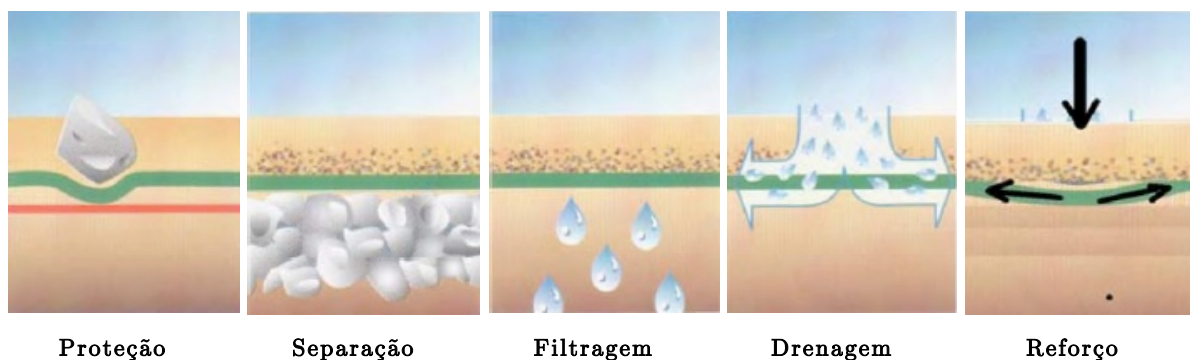


Figura 6 - Funções associadas ao uso de geossintéticos (Duarte , 2009)

A evolução dos geossintéticos, aliada à necessidade de desempenho de funções específicas, levou que estes começassem a ser utilizados como barreiras e em controlo de erosão. Tais funções estão especificadas na norma EN ISO 10318, Geosynthetics Terms and definitions, da Comissão Europeia de Normalização (CEN). Na Tabela 12 apresentam-se as funções associadas a cada tipo de geossintético.

Tabela 12 – Funções associadas a cada tipo de geossintético (Koerner, 2005)

Tipo de geossintético	Função						
	Separação	Reforço	Filtração	Drenagem	Proteção	Barreira	Controlo erosão
Geotêxtil	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Geogrelha		✓		✓			
Georrede				✓✓			
Geomembrana					✓✓	✓	
Geocompósito		✓			✓		
- Drenante	✓		✓	✓			

- Reforço	✓	✓	✓		
- Bentonítico	✓			✓	✓
Geo-outros:					
- Geocélulas		✓		✓	✓
- Geocolchões				✓	✓
- Geotubos			✓		
- Geospumas				✓	

- **Separação**

A utilização de geossintéticos como barreira de separação surge com o objetivo de separar camadas de materiais de diferentes tipos ou granulometrias, de forma a evitar a mistura e interpenetração destes (Koerner, 2005).

A função de separação é assegurada pela inserção de uma camada entre os materiais a separar, sendo esta constituída por um ou uma combinação de geossintéticos. A colocação desta camada constitui uma barreira permeável e flexível, que garante o correto funcionamento e a integridade dos materiais que separa. A aplicação de geossintéticos pode, na maior parte dos casos, levar ainda a um melhoramento das características dos solos que com este interage (Lopes & Lopes, 2010).

Em obras rodoviárias, ferroviárias e fundações, a utilização de geossintéticos como barreira de separação é normalmente utilizada na interface entre o solo de fundação e camada de material sobrejacente, geralmente material granular. Esta utilização permite evitar a penetração das partículas do material granular no solo de fundação, fator que iria contribuir para a redução da sua capacidade resistente, e permite evitar também o preenchimento dos vazios por parte das partículas finas do solo de fundação, que afetaria a capacidade drenante da camada granular. Nestes casos para além da função de separação, a camada constituída pelo geossintético pode assumir também funções de reforço.

Esta versatilidade de funções associadas ao uso de geossintéticos, torna, em diversos casos, difícil a identificação da função primária a que estes se destinam. A seleção da função primária, no caso de separação e reforço, pode ser feita com recurso a métodos empíricos, nomeadamente a avaliação do *california bearing ratio* (CBR) do solo. Para valores de CBR baixos, inferiores a 3, considera-se como função principal o reforço, sendo para tal mobilizada a resistência à tração no geossintético, levando a grandes deformações. Na presença de valores de CBR superiores a 8, considera-se a função primária a separação. Para valores intermédios, será necessária uma análise mais cuidada da situação específica do local (Yin & Shukla, 2006).

As funções de separação e reforço trabalham bem em conjunto, pois a aplicação de um geossintético com função de reforço leva a uma redução das deformações, que, por conseguinte, reduz a mistura de partículas, enquanto que a função de separação, ao prevenir a mistura de partículas, previne a perda progressiva de força por parte da camada de solo (Yin & Shukla, 2006).

O material mais utilizado para exercer funções de separação é o geotêxtil, devido às suas características mecânicas e hidráulicas, devendo no entanto ter-se em consideração as condições e os solos em causa (Lopes & Lopes, 2010).

- **Filtragem**

A função de filtragem consiste na utilização de um geossintético como uma barreira (filtro), que permite o fluxo de fluidos no seu interior ou através deste, retendo as partículas de solo sujeitas a forças hidrodinâmicas (NP EN 10318).

O geossintético permite o livre escoamento de fluidos evitando o arrastamento de partículas sólidas no plano normal a este, devido ao equilíbrio gerado pelo sistema solo-geossintético. Estas condições de equilíbrio proporcionam a definição de três zonas, a zona de solo não perturbado, a camada de filtro de solo e a camada de transição. A camada de solo não perturbado é a zona do solo que mantém as suas características originais. A camada de filtro de solo é a uma camada constituída por partículas cada vez mais finas à medida que se aproxima do geossintético e, por fim, a camada de transição trata-se de uma estrutura porosa que como o próprio nome indica estabelece a transição entre a camada de solo não perturbado e a camada de filtro de solo (Yin & Shukla, 2006).

A função de filtragem apresenta, também, características de separação. De fato, a distinção entre estas duas funções pode ser de difícil percepção, residindo a diferença apenas na quantidade de fluxo de fluido que atravessa o geossintético.

A quantidade de fluxo de fluido é um dos fatores que condicionam o dimensionamento dos geossintéticos a aplicar. Para tal, o material a utilizar deverá apresentar características hidráulicas, dimensão de aberturas da sua malha e flexibilidade apropriadas, permitindo uma boa interface entre materiais, impedindo a migração de partículas para os vazios, e evitando também a colmatação do geossintético (Lopes & Lopes, 2010).

Para o desempenho de funções de filtragem são comumente utilizados geotêxteis, por exemplo em valas drenantes de areia, a envolver tubagens perfuradas, como filtros em solo ou gabiões, entre outros.

- **Drenagem**

De acordo com a NP EN 10318, a função de drenagem, associada à utilização de um geossintético, consiste na recolha e transporte de fluidos (águas pluviais, águas freáticas e

outros) através de um plano de drenagem. O geossintético assegura um fluxo adequado do fluido no seu plano e garante uma migração limitada das partículas de solo.

A utilização de geossintéticos com função de drenagem não surge de forma isolada, isto é, aquando da sua aplicação, este pode ainda desempenhar funções de filtragem e permitir a dissipação da pressão da água nos poros (Yin & Shukla, 2006).

Da mesma forma que em outras funções, para utilização de geossintéticos com funções drenantes é necessário ter em consideração algumas exigências e características de forma a que estes possam ter o melhor desempenho possível. Assim sendo, de forma a que seja assegurada a drenagem de fluídos no plano do geossintético com uma pequena perda de carga, uma migração mínima das partículas de solo e a não colmatações do geossintético, estes devem possuir uma espessura, abertura de malha e compressibilidade apropriadas (Lopes & Lopes, 2010).

Os geossintéticos mais utilizados neste tipo de função são os geotêxteis. Para fluxos mais elevados são utilizados geocompósitos drenantes. Este tipo de material é também utilizado em drenos verticais pré fabricados (DVPs), com a finalidade de acelerar a consolidação de solos moles sobre aterros com e sem pré-carga.

- **Reforço**

A função de reforço consiste na utilização de um geossintético com o objetivo de proporcionar uma melhoria das propriedades mecânicas de uma massa de solo ou material de construção (NP EN ISO 10318). Esta melhoria é essencialmente conseguida à custa da mobilização do comportamento carga-extensão do geossintético.

A utilização de geossintéticos em funções de reforço surge com a necessidade de complementar as capacidades resistentes de alguns materiais. Estes materiais, normalmente sedimentos ou argilas, possuem uma boa resistência à compressão, apresentando no entanto fraca capacidade de resistência a tensões de tração (Koerner, 2005). As características associadas aos geossintéticos, nomeadamente a sua capacidade de resistência à tração, permite que o “geocompósito” formado pelo solo+geossintético, suporte tensões mais elevadas que as inicialmente suportadas e restrinja eventuais deformações, principalmente em estruturas geotécnicas (Lopes & Lopes, 2010). Tal fato permite concluir que a aplicação de geossintéticos, para além da melhoria da capacidade de carga implementada em maciços terrosos, permite, também, uma melhoria da estabilidade do mesmo.

O reforço de solos pode ser feito recorrendo à inclusão de materiais relativamente inextensíveis e extensíveis, podendo o mecanismo de funcionamento desse reforço ser definido com recurso a conceitos de tensões induzidas e deformações induzidas. No

conceito das tensões induzidas, entende-se que a coesão do sistema solo+reforço é garantida a custa da resistência à tração e atrito na interface dos materiais, proporcionada pelo elemento de reforço introduzido, enquanto que o conceito das deformações induzidas garante o reforço da resistência a tração através do controlo de deformações (Yin & Shukla, 2006).

De acordo com Fluet (1998) a função de reforço pode ser dividida em duas categorias: quando o geossintético se encontra entre duas camadas sujeitas a pressões diferentes e a sua tensão equilibra as diferenças de pressão – neste caso diz-se que o geossintético exerce uma ação mecânica de membrana, suportando este uma tensão de tração e uma carga normal ao seu plano – e quando o elemento de reforço se encontra no interior de um maciço apenas com funções de suporte de tensões de tração.

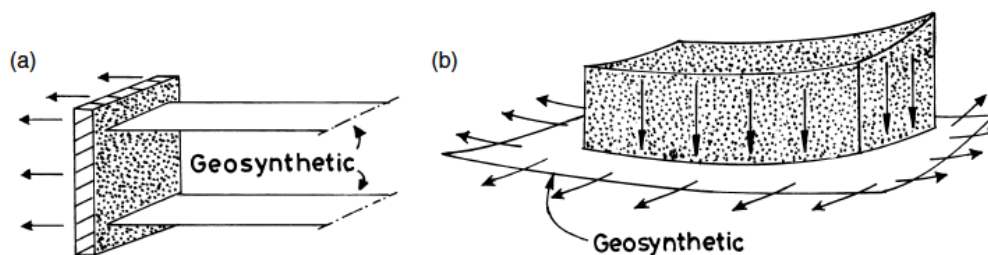


Figura 7 – Geossintético com função de reforço: a) interior do maciço; b) na separação de camadas (Yin & Shukla, 2006)

No entanto, Koerner (2005) define três mecanismos para solos reforçados, acrescentando aos anteriormente referidos um mecanismo nomeado de deslizamento. Neste tipo de mecanismo, o geossintético fica sujeito a uma tensão de tração devido ao deslizamento do solo sobrejacente a este.

O reforço de solo com recurso a geossintéticos permite, como já referido, uma melhoria substancial das características mecânicas do solo. Este incremento permite a resistência deste a esforços de corte mais elevados, levando no caso de reforço de taludes ou aterros, que estes possam apresentar maiores inclinações (Lopes & Lopes, 2010).

Os materiais comumente utilizados para efetuarem este tipo de funções são os geossintéticos, geogrelhas e geocompósitos de reforço. Estes materiais podem ser utilizados:

- Sobre fendas para suportar geomembranas não reforçadas (Geotêxtil);
- Em estradas não pavimentadas, de forma a minimizar o levantamento de solo da base;
- Em aterros sobre solos moles e taludes.

- **Proteção**

Na NP EN ISO 10318, a função de proteção é descrita como sendo a utilização de geossintéticos de forma a evitar ou limitar a danificação de elementos ou materiais sujeitos ao efeito de ações localizadas sobre as suas superfícies.

O mecanismo de funcionamento da barreira protetora, constituída por geossintéticos, consiste essencialmente na absorção e distribuição das tensões e deformações a transmitir à camada de material a proteger (Yin & Shukla, 2006). Tal fato é conseguido através da colocação de geossintéticos entre dois materiais permitindo a proteção de um deles, face às cargas e deformações induzidas pelo outro.

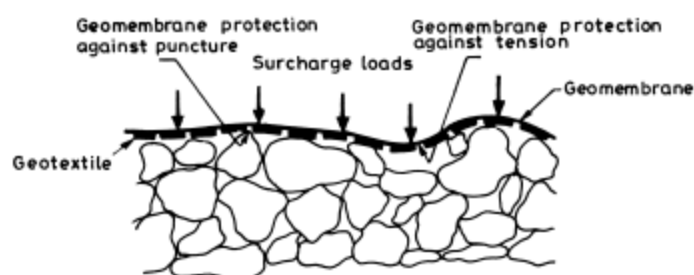


Figura 8 – Geotêxtil com função de proteção (Yin & Shukla, 2006)

A utilização de geossintéticos neste tipo de funções requer o conhecimento prévio das suas características mecânicas de forma a proceder-se ao seu correto dimensionamento. Dois aspetos importantes para um bom desempenho da função são a espessura do geossintético e a sua forma de aplicação. Este último aspeto é bastante importante, pois a aplicação da barreira protetora deve garantir a continuidade do material evitando zonas livres, onde não existe proteção.

O material mais utilizado para executar funções de proteção é o geotêxtil, podendo comumente ser encontrado como proteção de geomembranas, evitando a perfuração das mesmas, e em reabilitações de pavimentos asfálticos, protegendo a nova camada de betuminoso, da propagação de fendas preexistentes (Lopes & Lopes, 2010).

- **Controlo de erosão**

De acordo com a NP EN ISO 10318, a utilização de geossintéticos com função de controlo de erosão permite evitar ou minimizar o movimento de partículas de solo da superfície de taludes ou margens de rios.

A técnica de controlo de erosão com geossintéticos consiste na colocação destes sobre o elemento a controlar, exercendo assim uma proteção aos agentes erosivos (agentes atmosféricos, tráfego, etc) e exercendo, também, uma função de “reforço”, no caso de solos não coesivos, sempre com a finalidade de minimizar ou evitar a migração de partículas de solo.

A execução deste controlo com recurso à utilização de geossintéticos pode ter carácter permanente o temporário. Normalmente, em casos de protecção temporária, são utilizados geossintéticos biodegradáveis, de forma a promover posteriormente o crescimento de vegetação. Embora este método seja de carácter temporário, o crescimento de vegetação assegura, através da fixação de uma matriz de raízes, o controlo do desgaste do solo a longo prazo. Como é facilmente compreensível, o tipo de vegetação dependerá do tipo de solo, dependendo a eficiência deste directamente destes dois fatores (Theisen, 1992).

O uso de geossintéticos para a execução deste tipo de funções é geralmente utilizado em taludes de aterros e em revestimento de leitos de canais ou lagos. Nos últimos anos, o controlo de erosão com recurso a utilização de geossintéticos surge também associado a obras de engenharia costeira, onde a finalidade deste se prende com a retenção de areias, tendo a vantagem de minimizar o impacto ambiental e visual, normalmente associados a estruturas de betão ou rocha (Neves, Lopes, Gomes, & Pinto, 2009).

A utilização soluções de controlo de erosão em obras costeiras com recurso a geossintéticos surge como alternativa às tradicionais obras de betão, apresentando inúmeras vantagens, tais como a sua relação custo/eficácia, a facilidade de colocação, e o reduzido impacto no processo natural costeiro (Neves L. P., 2003).

Os geossintéticos geralmente utilizados para a execução deste tipo de funções são os geotêxteis, as geocélulas e os geocolchões.

- **Barreira de fluidos**

De acordo com a NP ENISO 10318, a utilização de geossintéticos com função de barreira de fluidos permite evitar a migração destes. Os geossintéticos utilizados com este tipo de função atuam como uma membrana impermeável, impedindo que líquidos ou gases os atravessem (Yin & Shukla, 2006).

A utilização de geossintéticos com este tipo de função, requer alguns cuidados, nomeadamente na fase de transporte e aplicação, de forma a que não sejam danificados, permitindo assim um bom desempenho na função a que se destinam. Este fato é importante para preservar as características do geossintético e possibilitar a resistência do mesmo às ações a que estará submetido durante a sua vida útil. Outro fato de grande relevância é a garantia da continuidade do material na ligação entre faixas, no processo de aplicação. Se a ligação não for executada corretamente e a continuidade do material não for garantida, a estanquidade da barreira não é conseguida.

Os geossintéticos mais utilizados para execução de funções de barreira de fluidos são as geomembranas e os geocompósitos bentoníticos (GCL). A utilização deste é normalmente feita em impermeabilizações da base e cobertura de aterros de resíduos, em

impermeabilizações de secções de túneis e no isolamento de solos contaminados, de forma a evitar a propagação da contaminação.

Como ficou demonstrado nos exemplos já referidos, os geossintéticos podem desempenhar várias funções em simultâneo, sendo estas condicionadas de acordo com as condições do local e o tipo de solo .

A seleção do geossintético e das suas características assenta principalmente sobre a relação hierárquica entre as funções que desempenhará. Assim sendo a características exigidas a um geossintético, variam consoante a função a que se destina, e também da sua aplicação. Posto isto, torna-se de vital importância identificar as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos geossintéticos de forma a que se proceda a um correto dimensionamento que ao longo da sua vida útil, proporcione um bom desempenho do mesmo.

3.2.1.1. Geotêxteis

Os geotêxteis são telas contínuas de fibras ou filamentos que se caracterizam pelo seu processo de fabrico, podendo ser tecidas, não tecidas e tricotas ou costuradas, e pelas suas características de permeabilidade e flexibilidade. Os geotêxteis tecidos conseguem-se por entrelaçamento de dois filamentos, feixes de filamentos ou bandas. Geralmente o entrelaçamento dos filamentos é realizado em ângulo reto.

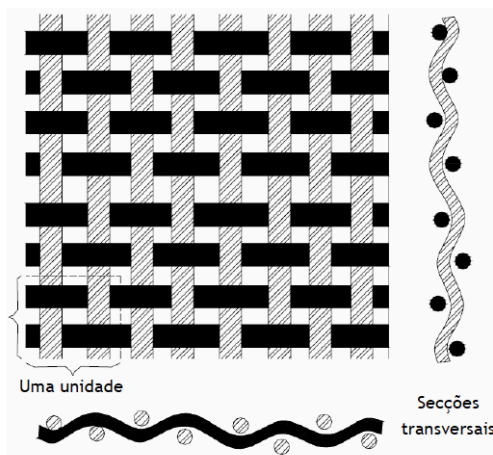


Figura 9- Estrutura tipo de geotêxteis tecidos (Carneiro, 2009).

Os geotêxteis não tecidos apresentam um estrutura constituída por fibras, podendo estas estar aleatoriamente ou direccionalmente orientadas, na ligação a uma estrutura plana. A ligação pode ser obtida de forma química, térmica ou mecânica. Na ligação química as fibras são ligadas nos pontos de contato recorrendo a resinas ou emulsões. O recurso à ligação térmica implica o que as fibras sejam parcialmente fundidas nas zonas de contato,

através de uma ação conjunta de pressão e temperatura de rolos aquecidos. Na ligação mecânica a fibras são unidas por um conjunto de agulhas.

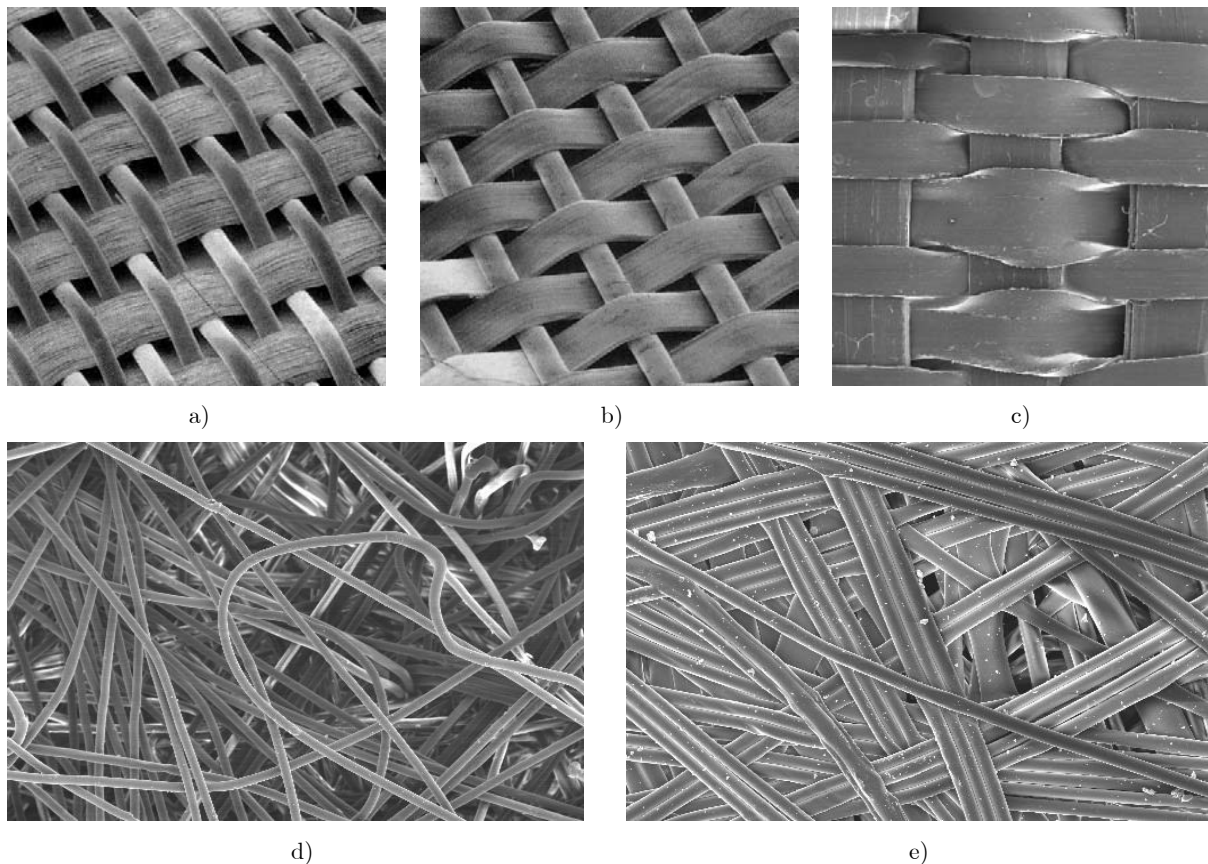


Figura 10- Geotêxteis: a) tecido com monofilamento e multifilamento; b) tecido com monofilamento e tira; c) tecido com tiras; d) não tecido com ligação mecânica; não tecido com ligação térmica (Carneiro, 2009).

Funções e aplicações

As características de um geotêxtil variam em função da sua aplicabilidade. Para tal, características como espessura, porosidade, deformabilidade, resistência ao rasgamento e ao punçoamento, resistência a tração, permissividade, porosidade e transmissividade devem ser consideradas na escolha do geotêxtil relativamente à função a que este se destinará. Geralmente para funções de reforço são utilizados geotêxteis tecidos, pois tendem a ser mais resistentes as tensões aplicadas. Os geotêxteis não tecidos são mais utilizados como filtros, meios de separação entre materiais e proteção (LaGrega, Buckingham, & Evans, 2001).

Posto isto, os geossintéticos podem ser correntemente aplicados com função de:

- Separação em:
 - Entre a sub-base e o balastro, em obras ferroviárias;

- Entre camadas de asfalto, no caso de reabilitação de pavimentos, fazendo a separação entre o asfalto existente e a nova camada;
- Entre camadas drenantes de diferentes granulometrias.
- Filtragem em:
 - Obras rodoviárias, de forma a evitar o arrastamento de finos para a camada granular drenante;
 - Drenos, permitindo o escoamento através deste;
 - Em obras de proteção costeira e fluvial, de forma a evitar a erosão dos solos;
 - Em aterros de resíduo, nomeadamente na parte superior da camada drenante da zona basal da célula de deposição, e em drenos efetuados na construção deste tipo de infraestrutura.
- Drenagem em:
 - Bases de aterros rodoviários, de forma a dissipar as pressões da água nos poros;
 - Drenos de pavimento e laterais;
 - Valas de drenagem, utilizadas em aterros de resíduos, nomeadamente no fundo de aterro e taludes;
 - Drenos verticais pré-fabricados.
- Reforço em:
 - Fundações de pavimentos rodoviários ou aterro sobre solos moles;
 - Obras de contenção e reforço de taludes de aterros, permitindo a construção destes com superiores, impossíveis em solos não reforçados;
 - Reabilitação de pavimentos rodoviários;
- Proteção em:
 - Aterros de resíduos, como proteção das geomembranas, de forma a evitar o punçoamento devido à ação de material anguloso presente nos solos adjacentes ou camada de drenagem, e para prevenir eventuais perfurações resultantes da deposição de resíduos;
 - Aterros de resíduos, como cobertura diário dos mesmos, de forma a prevenir o arrastamento de poeiras e resíduos, como consequência da ação de animais ou ações climáticas.
- Controlo de erosão em:
 - Em taludes, aplicados em barreiras verticais, de forma a reter os sedimentos transportados pelo escoamento superficial, evitando a erosão destes.

A aplicações de geotêxteis em obras de engenharia vai para além das funções referidas, sendo atualmente utilizados também como cofragens flexíveis para betão, como geossacos e na construção de geotubos cilíndricos, de dupla camada preenchidos com areia, para criar diques ou desidratar lamas.

3.2.1.2. Geogrelhas

As geogrelhas surgem pela primeira vez na década de 80, em Inglaterra e têm origem com o desenvolvimento de materiais poliméricos de alto módulo de rigidez (Koerner, 2005).

Este tipo de geossintético não é mais do que um material polimérico plano, constituído por uma estrutura aberta como elementos resistentes à tração que se ligam entre si de modo regular (IGS). A principal característica das geogrelhas prende-se com a abertura da sua malha. Tal característica permite a drenagem vertical do solo, e um bom entrosamento entre as partículas de solo e a geogrelha, proporcionando um bom funcionamento do conjunto através de um mecanismo de interação. Este mecanismo de interação ocorre com a penetração do material na malha que leva à ocorrência de trações nos elementos transversais, que transmitem essas tensões através dos nós de ligação, aos elementos longitudinais. Para que não ocorra a rotura da geogrelha é necessário que os elementos longitudinais, transversais e nós possuam uma rigidez e uma capacidade de resistir à tração adequada (Duarte, 2009).

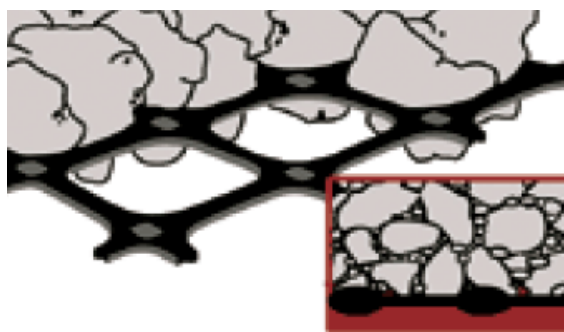


Figura 11 - Mecanismo de interação geogrelha com partículas de solo (ENGEPOL).

As geogrelhas podem ser classificadas relativamente à sua resistência à tração, ao processo de fabrico e as suas características físicas. Assim sendo relativamente à resistência à tração, estas podem ser uniaxiais, se apresentam elevada resistência numa das direções e biaxial se apresentam resistência elevada nas duas direções (Koerner, 2005).

Relativamente ao processo de fabrico podem ser considerados três tipos de geogrelhas: as extrudidas, as tecidas e as soldadas a laser. As extrudidas resultam, como o próprio nome indica, do processo de extrusão de resinas de PEAD ou de PP. O processo de extrusão desenvolve-se basicamente em duas etapas: uma primeira, onde ocorre a perfuração da

folha do polímero aditivado e uma segunda, onde esta mesma folha é sujeita a um aquecimento e alongamento na direção de fabrico. Caso o processo termine nesta fase, as geogrelhas produzidas serão denominadas de geogrelhas extrudidas uniaxiais. No entanto, se se repetir o processo de aquecimento e alongamento na direção transversal, obtêm-se geogrelhas extrudidas biaxiais (Lopes & Lopes, 2010).

As geogrelhas tecidas diferem das anteriores na constituição das barras longitudinais e transversais. Neste tipo de geossintético, as barras são obtidas pela união de centenas de fibras de poliéster de tenacidade elevada (PET), sendo os nós realizados por tricotagem ou entrelaçamento. Uma alternativa à execução dos nós por tricotagem ou entrelaçamento é o recurso a ligações térmicas. Neste caso, as geogrelhas em PET são envoltas numa folha de PP, sendo executada posteriormente a fusão nos pontos de cruzamento (Lopes & Lopes, 2010). De forma a dar estabilidade dimensional as barras, e garantir a sua proteção durante a fase de instalação, é aplicado um revestimento que pode ser em materiais como PVC, látex, betuminoso ou outros (Koerner, 2005).

Outra forma de classificar as geogrelhas, é relativamente às suas características, podendo ser rígidas ou flexíveis. São consideradas rígidas as geogrelhas extrudidas, ao passo que as tecidas se consideram flexíveis (Duarte, 2009).

3.2.1.3. Georredes

As georredes são materiais planos, à base de polímeros, que possuem uma estrutura aberta (semelhante às geogrelhas), constituída por conjuntos de barras paralelas sobrepostas e ligados a outros conjuntos idênticos, segundo ângulos variáveis formando uma malha densa e regular (IGS).

A primeira utilização de georredes em aterros de resíduos, surge nos Estados Unidos em 1984, associada à drenagem de lixiviados (Duarte, 2009). Desde a sua origem até 1994, as georredes eram inseridas na família das geogrelhas, pois apresentavam um processo de fabrico semelhante. No entanto, o fator que motivou a separação e a criação da família das georredes foi a principal diferença entre elas, a função. Enquanto que as geogrelhas se destinam a funções de reforço, as georredes são associadas a funções de drenagem (Carneiro, 2009).

Embora as georredes sejam utilizadas apenas para drenagem, não se tratam de materiais frágeis, muito pelo contrario, possuem até uma razoável capacidade de resistência à tração (Koerner, 2005).

As georredes são fabricadas recorrendo a um processo de extrusão de polímeros fundidos (polietileno), através de aberturas em moldes rotativos, dando origem a nervuras paralelas

nos dois sentidos, formando assim uma malha (Koerner, 2005). O polietileno (PEAD) utilizado no fabrico de georredes, apresenta uma boa resistência química e uma boa resistência aos raios ultravioleta, sendo que esta última é conseguida através da adição do negro de fumo na sua composição (Duarte, 2009).

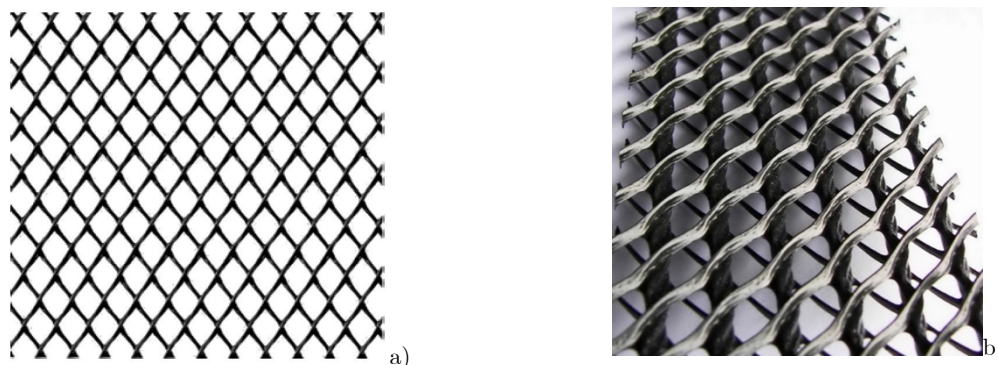


Figura 12 – Exemplo de georredes: a) com malha hexagonal; b) triaxial (ENGEPOL).

Normalmente, as georredes surgem associadas a outros geossintéticos, como geotêxteis, geomembranas ou outros, sendo estes aplicados na parte superior e inferior da georrede. A associação de materiais surge com a necessidade de prevenir a intrusão de solo nas aberturas da georrede, que introduziria uma redução da capacidade drenante do material (Koerner, 2005).

A associação de dois ou mais geossintéticos, com a finalidade de proporcionar um melhor desempenho de cada um, como foi já referido, dá origem a um geocompósito. No caso da associação da georrede com geotêxtil não tecido, obtém-se um geocompósito designado por geocompósito drenante. Este geocompósito é composto por uma georrede aderida por calor ao geotêxtil (Duarte, 2009).

A interação entre os dois materiais permite que a georrede assegure as funções de drenagem através dos canais existentes no seu núcleo e que o geotêxtil assuma funções de proteção, impedindo a colmatação desses canais (Duarte, 2009).

Este tipo de geossintético apresenta grandes vantagens, tais como a sua pequena espessura e a rapidez de instalação. Desta forma torna-se um excelente opção relativamente aos tradicionais drenos com camadas de areia ou brita. A utilização destes em aterros de resíduos permite, devido a sua reduzida espessura, a uma maior capacidade de armazenamento (Duarte, 2009).

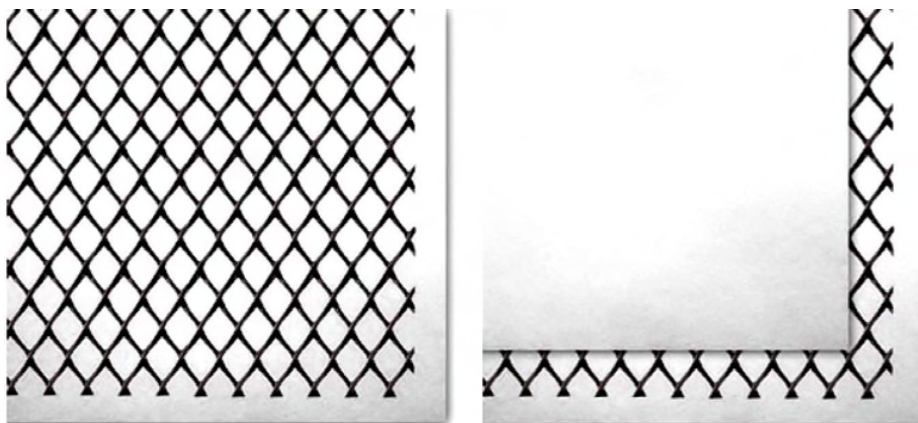


Figura 13- Geocompósito drenante (Duarte , 2009))

3.2.1.4. Geomembranas

As geomembranas, também designadas de barreiras geossintéticas poliméricas, são telas contínuas e flexíveis fabricadas a partir de um ou mais materiais sintéticos, que se caracterizam pela sua baixa permeabilidade (Shukla, 2002).

Estas podem ser fabricadas por três processos: extrusão, espalhamento superficial ou calandragem. O processo de extrusão consiste na extrusão de polímeros fundidos e aditivos, dando origem a uma membrana não reforçada. Caso se pretenda uma geomembrana reforçada, após o processo de extrusão é adicionado um geotêxtil. O fabrico de geomembranas por espalhamento superficial consiste no espalhamento de um polímero ou composto asfáltico sobre uma folha de papel, sendo esta posteriormente eliminada. A conclusão deste processo leva à produção de geomembranas não reforçadas. Caso se pretendam geomembranas reforçadas, o processo é idêntico mas, neste caso, é utilizado um geotêxtil, tecido ou não tecido, em substituição da folha de papel. O geotêxtil deve ser completamente revestido.

O processo de calandragem, consiste na passagem do material por cilindros aquecidos, de rotação contrária, permitindo a produção de geomembranas com multicamadas (Shukla, 2002). Este processo pode surgir associado ao processo de extrusão, de forma a uniformizar a superfície do material e melhorar as suas características mecânicas (Carneiro, 2009). A obtenção de geomembranas reforçadas pelo processo de calandragem é conseguida através da inserção de geotêxtil entre camadas da geomembrana (Lopes & Lopes, 2010).

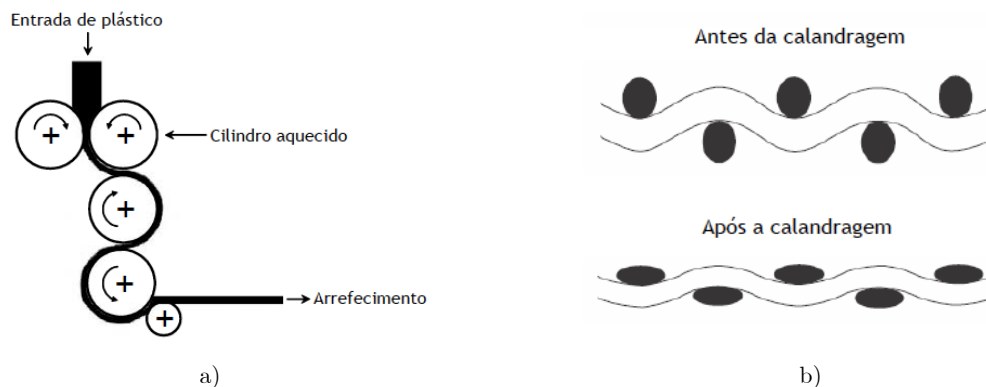


Figura 14 - Fabrico de geomembrana por calandragem: a) esquema geral; b) efeitos da calandragem (Carneiro, 2009).

As geomembranas podem ser divididas em dois tipos, de acordo com a sua superfície, sendo lisas ou rugosas. As geomembranas rugosas podem ter origem em geomembranas lisas, onde podem ser aplicados processos como pulverização, impressão ou laminação, de forma a conferir-lhes uma textura rugosa (Koerner, 2005). A finalidade da aplicação destes processos de forma a conferir uma textura rugosa, prende-se com a necessidade de proporcionar um aumento do atrito na ligação da geomembrana a outros materiais (Carneiro, 2009).

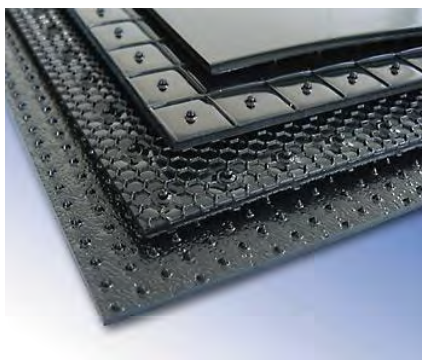


Figura 15- Diferentes texturas das geomembranas de PEAD (Duarte , 2009)

Para além destas características, as geomembranas podem ser caracterizadas pelo tipo de material que as constitui, podendo ser termoplásticas, termoplásticas cristalinas, termoplásticas elastoméricas e elastoméricas. Na confecção destas podem ser utilizados materiais tais como policloreto de vinilo (PVC), polietileno de baixa e alta densidade, polipropileno, polietileno clorado, entre outros (McBean, Rovers, & Farquhar, 1995).

As geomembranas de PEAD são normalmente constituídas por 97,5% de polietileno, 2,5% de negro de fumo e vestígios de termoestabilizantes e antioxidantes. Os antioxidantes e os termoestabilizantes garantem a resistência as condições climáticas, aumentando a

resistência à degradação. O negro de fumo, como já referido aquando da exposição de outros geossintéticos, permite o aumento da resistência aos raios ultravioleta (Duarte, 2009).

As geomembranas possuem, ainda, outras propriedades, podendo estas ser físicas, mecânicas ou operacionais. Por propriedades físicas são entendidas a espessura, o peso específico e a flexibilidade da geomembrana, enquanto que nas propriedades mecânicas se inserem a resistência à tração, ao rasgamento, ao punçoamento e extensão. As propriedades operacionais englobam a temperatura de aplicabilidade e a estabilidade dimensional (Duarte, 2009).

3.2.1.5. Geocompósitos

Os geocompósitos são constituídos pela associação de dois ou mais tipos de materiais, sendo que pelo menos um desses materiais se trata de um geossintético (Carneiro, 2009). A associação destes materiais surge com a finalidade de combinar as melhores características que cada um apresenta, de forma a que estes possam ser utilizados de uma maneira mais eficiente nas funções a que se destinam, com outro fator relevante, um menor custo (Koerner, 2005).

Os geocompósitos podem ser classificados de acordo com a função a que se destinam. Normalmente podem ser encontrados geocompósitos bentoníticos (geocompósitos argilosos (GCL's)), geocompósitos de drenagem e geocompósitos de reforço (Lopes & Lopes, 2010).

a) Geocompósitos bentoníticos

Os geocompósitos bentoníticos, também designados por barreiras geossintéticas argilosas (GCL's – Geosynthetic Clay Liners), são constituídos por uma camada de bentonite, envolta em geotêxteis ou geomembranas. Os geotêxteis que compõem este geocompósitos são normalmente cosidos ou agulhados recorrendo ao núcleo de bentonite, proporcionando um aumento da resistência ao corte do geocompósito. No caso de serem utilizados geomembranas, a ligação ao núcleo de bentonite é feito com recurso a adesivos químicos (Koerner, 2005). Outra possibilidade de ligação do núcleo de bentonite ao geotêxtil é conseguida através da execução de soldadura a quente.

o Agulhagem

O processo de fabrico de geocompósitos bentoníticos com recurso a agulhagem, consiste na perfuração das camadas que o compõem (geotêxtil + bentonite + geotêxtil), por um conjunto de agulhas. Estas agulhas possuem uma característica fundamental neste processo,

pois são farpadas, o que permite aquando da sua remoção que as fibras se mantenham estáveis, segurando os componentes do geocompósito.

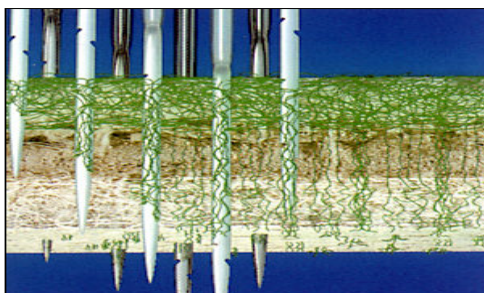


Figura 16 - Processo de ligação por agulhagem

Este processo aumenta o desempenho da bentonite, devido ao estado de pressão que é instalado. Outra vantagem da utilização deste processo no fabrico destes geocompósitos é o aumento que proporciona na resistência ao corte interna do geocompósito e no ângulo de fricção com o material adjacente.

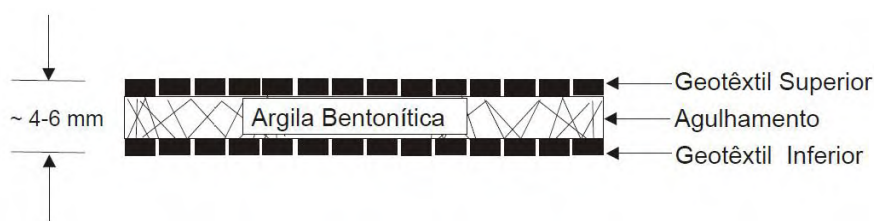


Figura 17 - Argila bentonítica agulhada em geotêxtil (Duarte , 2009)

o **Costura**

Este processo à semelhança do anteriormente exposto, é conseguido com recurso a agulhas. Estas agulhas, dotadas de linhas, estão presentes em ambos os lados do geocompósito. O processo consiste basicamente na execução de uma costura, que é efetuada com o encontro das agulhas. As costuras são realizadas apenas na direção de produção, e podem apresentar uma distância entre elas variável, fator este que permite a livre movimentação da bentonite. Um fato importante neste geocompósito, é a transmissão das forças, que se dá apenas na direção da costura.



Figura 18 - Processo de costura de argila bentonítica a geotêxteis (Duarte , 2009)

o **Adesivos químicos**

A ligação da bentonite a geotêxteis ou geomembranas pode ser feita por recursos a adesivos químicos. Para tal, no processo de fabrico, são adicionados à bentonite adesivos

que permitem que os componentes se mantenham ligados. Esta ligação é quebrada com o processo de hidratação da bentonite, sendo as forças de capilaridade a única forma de manter o conjunto ligado. No manuseamento e instalação destes geocompósitos é necessária particular cautela, para que não sejam criadas zonas de migração da bentonite, pondo em causa o funcionamento para o qual este é fabricado.

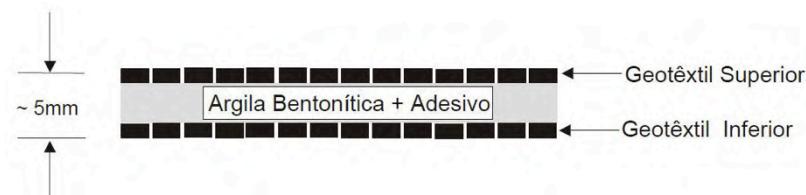


Figura 19 – Ligação de núcleo de argila bentonítica a geotêxteis com recurso a adesivos químicos (Duarte , 2009)



Figura 20 – Ligação de núcleo de argila bentonítica a geomembrana com recurso a adesivos químicos (Duarte , 2009)

○ **Soldadura a quente**

Outro processo de ligação entre o núcleo de bentonite e o geotêxtil, é a soldadura a quente. A realização deste tipo de soldadura é feito com recurso a um aquecimento, que faz com que as fibras plásticas da bentonite se liguem ao geotêxtil que é colocado sobre esta. Nos geocompósitos realizados com este tipo de ligação, a movimentação da bentonite entre os geotêxteis é permitida.

• **Bentonite**

A bentonite utilizada nos geocompósitos bentoníticos pode apresentar-se em grão ou em pó. Esta pode ser agrupada essencialmente em três classes: bentonite sódica natural, bentonite cálcica enriquecida com sódio e a bentonite cálcica.

A bentonite sódica natural, apresenta as melhores características, sendo que (Koerner, 2005):

- É mais estável em ambientes químicos;
- Possui maior capacidade de absorção de água;
- Possui menores coeficientes de permeabilidade ($K < 5 \times 10^{-11}$ m/s);
- Apresenta um índice de dilatação ≥ 25 ml/2 g.

A bentonite cálcica enriquecida com sódio é obtida através da mistura de soda com bentonite cálcica. Este tipo de bentonite caracteriza-se por possuir:

- Índice de dilatação 20 ml/2 g;
- Capacidade de absorção de água inferior à da bentonite sódica natural;
- Coeficiente de permeabilidade $K < 5 \times 10^{-10}$ m/s.

A bentonite cálcica apresenta características como:

- Índice de dilatação de cerca de 10 ml/2 g;
- Capacidade de absorção de água muito baixa;
- Não se altera na presença de ambiente químico;
- Coeficiente de permeabilidade $K < 5 \times 10^{-9}$ m/s.

Caraterísticas

Os geossintéticos bentoníticos são utilizados como barreira hidráulica. A hidratação e consequente expansão da bentonite é um fator importante para o seu desempenho, acontecendo esta de forma diferenciada em função do líquido com que contactam.

As principais características deste geocompósito são: a sua condutividade hidráulica, a resistência ao corte e a autocicatrização. A condutividade hidráulica em geocompósitos bentoníticos varia entre cerca de 10^{-9} cm/s e 10^{-12} cm/s para geocompósitos bentoníticos envoltos em geotêxtil e aderidos a geomembranas, respetivamente. A resistência ao corte é essencialmente introduzida pelo agulhamento entre os geotêxteis, sendo que a bentonite hidratada apresenta baixa resistência ao corte. Para além da resistência ao corte, outro fato a ter em consideração é a resistência na interface de contato entre o geocompósito e o material adjacente. Outra característica da bentonite, prende-se com a sua capacidade de autocicatrização. A expansão da bentonite, associada a ciclos de secagem e humedecimento, resultam em danos, caracterizados normalmente pelo aparecimento de pequeno furos. A capacidade de autocicatrização da bentonite permite, após um novo processo de hidratação que estes danos sejam “fechados”, e recuperadas as propriedades hidráulicas da argila (Duarte , 2009).

b) Geocompósitos para drenagem

Os geocompósitos para drenagem, como o próprio nome indica, são utilizados para funções de drenagem. Este tipo de geossintéticos são normalmente associações de geotêxteis com georredes ou associações de geotêxteis com núcleos poliméricos, sendo esta efetuada correntemente com recurso a ligações térmicas (Lopes & Lopes, 2010). A utilização de geocompósitos com uma associação de geotêxtil com georrede, permite uma melhoria da capacidade drenante, sendo ao mesmo tempo satisfeitas as funções de filtração e separação.

Tal fato prende-se essencialmente com a presença do geotêxtil, podendo este ser aplicado em um ou ambos os lados da georrede (Koerner, 2005).

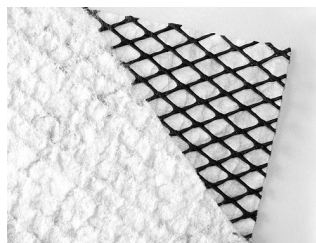


Figura 21 – Geocompósito drenante, associação de geotêxtil com georrede

Os geotêxteis com núcleo polimérico caracterizam-se pela presença de um núcleo semirrígido em forma de folha, obtido normalmente por um processo de extrusão, que permite o escoamento de líquidos através da sua estrutura. A utilização de geotêxteis neste tipo de geocompósito surge com a necessidade de proteção do núcleo, assegurando também funções de separação (Koerner, 2005).



a)



b)

Figura 22 – Geocompósito drenante, geotêxtil com núcleo polimérico: a) malha rígida de nylon; b) núcleo pitonado.

c) Geocompósitos para reforço

Os geocompósitos para reforço podem ser de diversos tipos, dependendo da associação de materiais realizada. Os mais utilizados são associações de geotêxteis com geogrelhas, a envolvência de fibras de aramida em geotêxteis não tecidos, a introdução de fibras de alta resistência tecidas sobre geotêxteis não tecidos e associação de geomembranas com geogrelha (Lopes & Lopes, 2010).

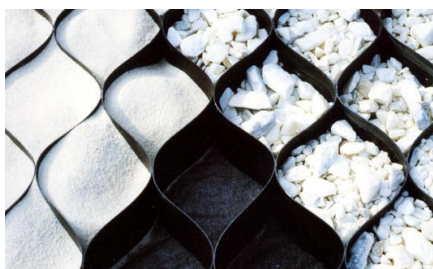
A utilização de geomembranas reforçadas com georredes, permite assegurar a funcionalidade das geomembranas, mantendo esta as suas características, sendo melhorada a sua capacidade de resistência a tração e fricção. Os geocompósitos compostos por geotêxteis e geogrelhas executam funções de drenagem e reforço, sendo normalmente utilizados para drenagem de aterros com solos de baixa permeabilidade e reforço de taludes (Koerner, 2005).

3.2.1.6. Outros geossintéticos

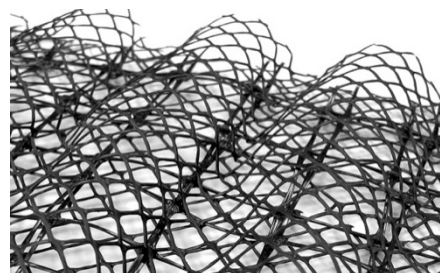
O desenvolvimento ocorrido na indústria dos geossintéticos, levou nos últimos anos ao aparecimento de novos geossintéticos, com características muito distintas. Exemplos disso são as geocélulas, geotubos, geoespumas e geocolchões. Estes caracterizam-se essencialmente pela função a que se destinam, estando esta dependente das características dos materiais.

a) Geocélulas

As geocélulas são estruturas tridimensionais, em forma de favo, formadas por tiras de poliéster ou polietileno de alta densidade, ligadas em determinados pontos (Yin & Shukla, 2006). As células formadas pelas ligações podem ser preenchidas com solo, areia, brita ou betão, dependendo da disponibilidade e finalidade a que se destina. A interligação, através de cordões poliméricos, de tiras de geogrelha com determinada largura, dá origem a geocélulas mais espessas designadas de geocolchões.



a) Geocélulas



b) Geocolchão

Figura 23 – Geossintéticos: a) geocélulas; b) geocolchões

As geocélulas são utilizadas com funções de controlo de erosão e reforço. Estas são normalmente aplicadas :

- Em estabilização de taludes e solos moles;
- Em proteção de taludes contra a erosão;
- Em canais e obras hidráulicas.

Os geocolchões são aplicados com função de controlo de erosão, podendo ser encontrados, entre outros, em taludes e margens de rios.

b) Geotubos

Os geotubos são tubos poliméricos, normalmente utilizados para a drenagem de fluidos ou gases. Estes podem ser lisos ou corrugados, perfurados ou não, e podem ser utilizados envoltos em geotêxtil (Yin & Shukla, 2006).

No processo de fabrico de geotubos podem ser utilizadas resinas poliméricas como o policloreto de vinilo (PVC), polietileno de alta densidade (PEAD), polipropileno (PP), polibutileno (PB) e acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) (Koerner, 2005). As tubagens

utilizadas atualmente são essencialmente fabricadas com recurso ao uso de PVC, PEAD e PP.

Os geotubos podem ser aplicados em diversas áreas tais como ambiente, geotecnia, hidráulica e transporte. A utilização deste material surge sempre associada à função de drenagem, quer de fluidos quer de gases. Este material pode normalmente ser encontrado:

- Como drenos em obras rodoviárias, ferroviárias e túneis;
- Em aterros de resíduos, como drenos, em sistemas de recolha e transporte de lixiviados e sistema de recolha e transporte de biogás;
- Em sistemas de abastecimento de água;
- Em sistemas de drenagem de águas residuais e pluviais.

c) Geoespumas

A geoespuma trata-se de uma espuma polimérica de poliestireno expandido (EPS), fabricada normalmente em placas ou blocos (Yin & Shukla, 2006).

Este tipo de geossintético é normalmente utilizado como:

- Isolamento térmica;
- Como enchimento leve para aterro;
- Como placa compressível, em muros de suporte, em fundações ou sob tubagens, de forma a reduzir as pressões aplicadas pelas terras adjacentes.

3.3. Construção do sistema de impermeabilização. Considerações

A construção do sistema de impermeabilização inicia-se após a conclusão da escavação da célula e das lagoas da estação de tratamento. O primeiro passo para a construção deste sistema é a regularização dos taludes e zona basal, de forma a que a que estes possam receber as camadas de material. Outro aspeto a ter em conta antes da construção do sistema de impermeabilização é a construção do sistema de drenagem sub-superficial.

Construído todo o sistema de drenagem sub-superficial da célula e executadas todas as valas de amarração, procede-se à colocação da barreira geológica natural.

3.3.1. Barreira geológica

A barreira geológica natural, é constituída por uma camada de 0,50 m de solo silto-argiloso, proveniente do material escavado. A aplicação deste material, bem como a sua compactação exigem um série de equipamentos. Neste caso foram utilizados:

- Dumper (transporte de material até ao local de aplicação);
- Escavadoras (para aplicação do material);

- Cilindro pés-de-carneiro (para a compactação);

A aplicação do material é feita, como já referido, em camadas de 20 cm, devidamente compactadas de forma a atingir um grau de compactação de 95%.

Relativamente aos taludes, aquando da execução desta exposição, apenas uma parte destes se encontravam revestidos com a primeira camada de solo. A aplicação da camada é feita garantindo não só a espessura definida, bem como o nivelamento e regularização da superfície da mesma.

A compactação deste material nos taludes, é efetuada com recurso à aplicação de pressão com o balde da escavadora. Embora este seja o método utilizado, entenda-se que não é o mais indicado, pois será difícil garantir a compactação desejada. Assim sugere-se a utilização de uma placa vibratória como a da Figura 24 , acoplada ao braço da escavadora.



Figura 24- Compactador de placa vibratória (http://www.cat.com/en_GB.html).

No caso da zona basal da célula, a aplicação do material é feita de forma análoga à aplicação nos taludes. O processo de compactação deverá ser executado com recurso a equipamentos compactadores, sendo os mais indicados para o efeito, os cilindros pés-de-carneiro. Este tipo de cilindro tem algumas características importantes, tais como o seu peso, a geometria dos pés e a pressão aplicada por cada um deles. Tornou-se o equipamento ideal para a compactação de solos argilosos, pois permite que seja evitada a laminação do solo na constituição das camadas, promovendo uma boa ligação entre elas e evitando um acréscimo do coeficiente de permeabilidade.



Figura 25-Cilindro pés-de-carneiro (http://www.cat.com/en_GB.html).

3.3.2. Geocompósito bentonítico

Para a colocação de geocompósitos bentoníticos, à semelhança do que acontece com os restantes geossintéticos, são necessários alguns equipamentos de apoio, tais como:

- Suporte de bobines (de forma a auxiliar a movimentação dos rolos de geossintéticos)
- Escavadora
- Lâmina de corte

Antes de se iniciar a colocação do geocompósito, deve proceder-se a uma verificação do material, garantido que este não se encontra sujo ou danificado. Outros pontos a serem observados são o estado do solo, a regularidade da camada que servirá de suporte, e as condições climáticas, não devendo este ser aplicado com condições de chuva.

A aplicação consiste no desenrolar das bobines de material sobre os taludes ou zona basal. Na zona das juntas, estes devem ser sobrepostos no mínimo 20 cm, acontecendo o mesmo em zonas onde o material se encontre danificado. De forma a garantir a continuidade do material na zona das juntas, deverá colocar-se bentonite em pó entre as extremidades dos painéis a unir, em quantidade definida pelo fabricante. No caso de aplicação em taludes, as juntas de sobreposição devem ser orientadas paralelamente à linha de maior declive.

3.3.3. Geomembrana

Sobre a camada constituída pelo geocompósito bentonítico será instalada uma geomembrana de PEAD lisa com 2 mm de espessura, que assegurará a contenção das águas lixiviantes, assumindo funções de barreira de fluidos. A instalação da geomembrana requer o cumprimento de uma série de requisitos, nomeadamente os relacionados com as condições climáticas em que será aplicada. Assim sendo, condições condicionantes tais como a temperatura, a precipitação e o vento devem ser consideradas, e evitadas.

A temperatura influencia essencialmente a dilatação e retração da geomembrana, devendo a sua aplicação ser feita em épocas de temperatura mais baixa, de forma a reduzir as solicitações de tração por retração e evitar a soldadura de painéis com rugas. A instalação com condições de chuva e vento são indesejáveis, pois estas condições podem provocar erosão em taludes e vala da ancoragem, bem como promover a movimentação da geomembrana, respetivamente. Na presença de vento, são geralmente utilizados sacos de areia, pneus, ou outro materiais que não danifiquem a geomembrana, como ancoragem provisória, de forma a impedir a movimentação da tela. (Barroso & Lopes, 2008).

Outro aspeto importante a ter em consideração antes de se iniciar a colocação da geomembrana é a preparação da superfície que lhe servirá de apoio, devendo ser garantida

a sua regularização e a não existência de objetos pontiagudos, pedras, ou outros materiais passíveis de introduzir danos na mesma. No caso em estudo, estes requisitos são facilmente garantidos, visto que esta será instalada sobre a camada constituída pelo geocompósito bentonítico. Esta, quando bem executada, garantirá uma boa superfície para receber a geomembrana. No entanto, deverá ser garantida a remoção de todos os equipamentos e materiais de apoio à colocação do geocompósito bentonítico.

A instalação é precedida da elaboração, por parte do responsável pela instalação, de um esquema de colocação, sendo este apresentado à fiscalização da obra, ficando sujeito a aprovação. Um exemplo deste esquema é apresentado na Figura 26.

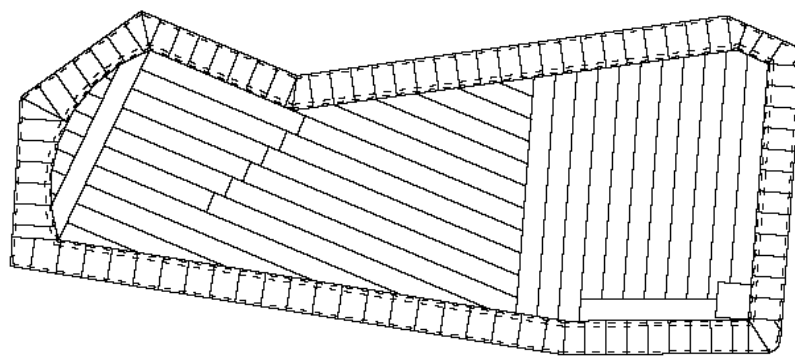
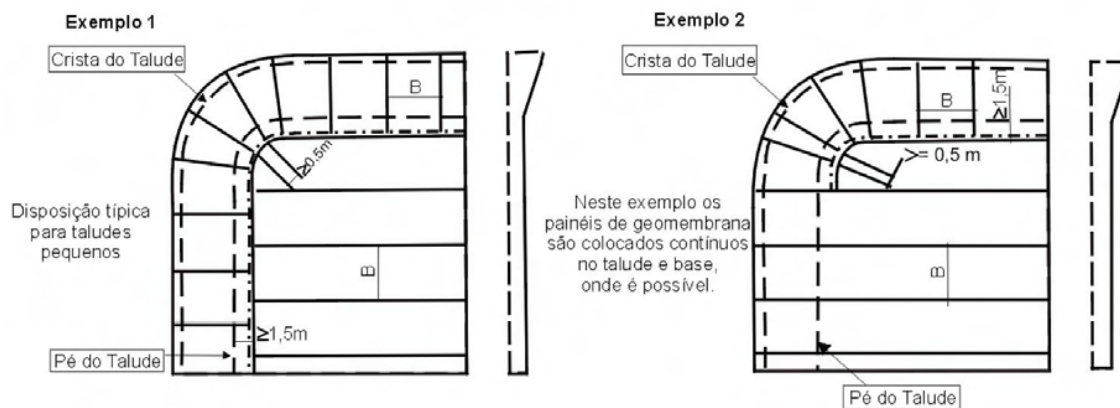


Figura 26 – Exemplo de esquema de colocação de geomembrana (Neoplastic).

A elaboração deste esquema revela-se, no entanto, insuficiente para a resolução de alguns problemas que surgem na colocação da geomembrana, resultantes da geometria das células de confinamento. De forma a colmatar esta falha, juntamente com o esquema devem ser apresentados pormenores para a disposição de painéis em zonas críticas como cantos e curvas.

No caso de cantos:



Figura

27-Disposição de painéis em taludes com comprimento inferior a 15m (Barroso & Lopes, 2008).

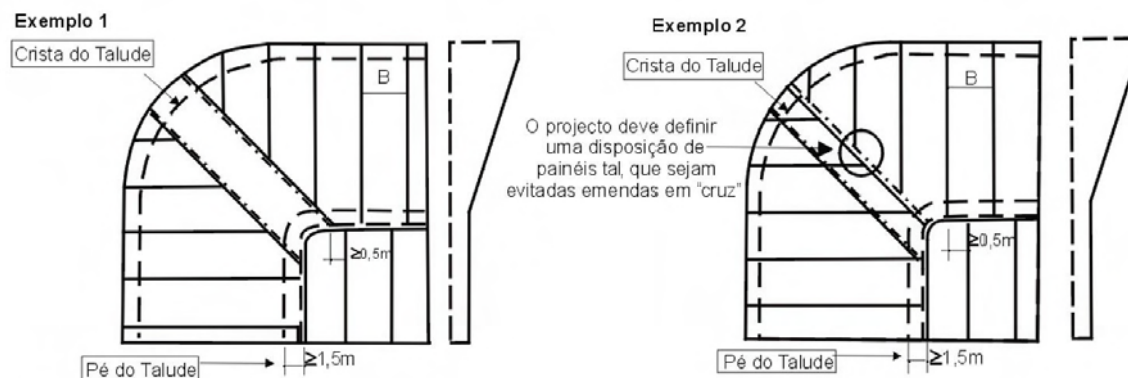


Figura 28 – Disposição de painéis com comprimento superior a 15m (Barroso & Lopes, 2008).

Estes pormenores definem algumas regras de colocação tais como:

- A colocação da geomembrana, deve ser executada paralelamente à linha de maior declive dos taludes;
- Devem ser evitadas uniões em cruz;
- Devem ser evitadas uniões em “T” com intervalos inferiores a 0,5 m;
- A união de entre painéis referentes à impermeabilização de taludes e zona basal, deve ser executada no mínimo a 1,5 m do pé do talude;
- É recomendável que a realização de sobreposições horizontais em taludes sejam apenas efetuadas em ultimo caso, devendo ainda assim cumprir os requisitos de não se localizarem na parte superior do talude e a uma distancia mínima de 1,5m do pé do talude.

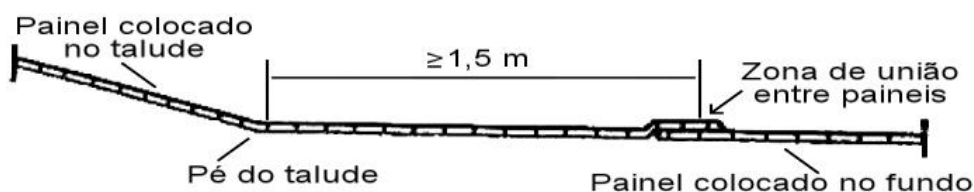


Figura 29- Ligação entre painéis referentes à impermeabilização de taludes e zona basal (Barroso & Lopes, 2008).

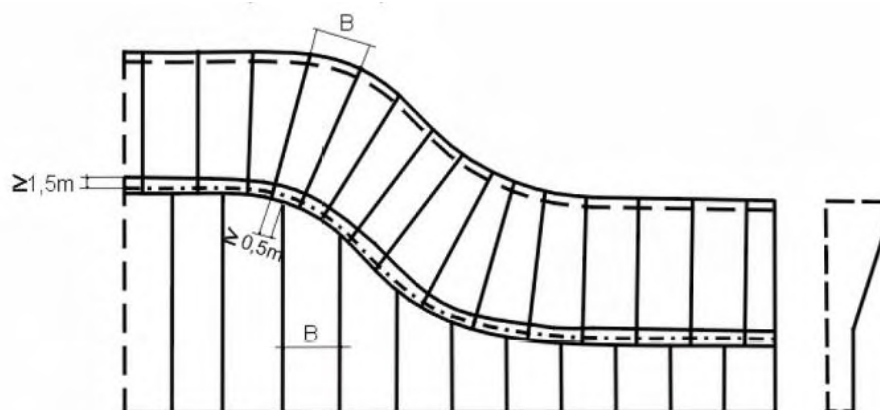


Figura 30 – Disposição dos painéis em desenvolvimento em curva (Duarte , 2009).

A colocação de painéis na zona de curva, deve ser efetuada de forma a garantir a existência do mínimo de rugas possíveis nos painéis e o comprimento de amarração na crista do talude.

Os painéis a aplicar devem ser numerados “*in situ*” se forma sequencial, devendo, aquando da aplicação, ser registado o seu número, a sua localização, a sua data de colocação e a identificação do rolo de geomembrana utilizada, para o caso de ser necessário a rejeição ou substituição de rolos (Barroso & Lopes, 2008).

A instalação deste tipo de geossintético é feita com recurso a alguns equipamentos, tais como:

- Escavadora com acessório para transporte de bobines (canga);
- Agarras para a puxar a geomembrana e coloca-la no zona prevista;
- Material para execução de soldaduras;
- Gerador para alimentação de equipamentos elétricos;
- Faca de lâmina curva para corte.

A colocação de geomembrana é normalmente feita de acordo com os seguintes passos:

- Transporte da bobine de geomembrana com auxilio de um retroescavadora, equipada com acessório adequada, protegendo a integridade do geossintético;
- Alinhamento da bobine de geomembrana na proximidade da área onde será instalada;
- Desenrolamento da bobine sobre a superfície com o auxilio de colaboradores;
- Colocada a geomembrana procede-se aos ajustes da sua posição e corte do painel;
- Repete-se o processo de colocação para os restantes painéis, tendo sempre em consideração as larguras de sobreposição;
- Execução da soldadura;

- Executada a soldadura procede-se à ancoragem provisória na vala de ancoragem, com sacos de areia, pneus ou outros materiais, desde que não danifiquem a geomembrana;
- De seguida procede-se ao corte e rebarbagem do excedente nas zonas de sobreposição, prolongamento e separação das geomembranas, de forma a garantir uma maior qualidade à soldadura realizada;
- Por fim, são registados os dados relativos à data, colocação de cada painel, pelo instalador.

Ainda relativamente à colocação de geomembranas, só deverão ser colocados por dia um número de painéis que se consigam soldar.

Soldadura

A ligação de painéis de geomembrana é feita com recurso a soldadura, sendo necessário que na colocação se promova à execução de uma largura de sobreposição entre painéis que garanta a execução de mesma. Na base do aterro as sobreposições devem ser feitas de acordo com a inclinação e o sentido de escoamento do lixiviado, como demonstra a Figura 31.

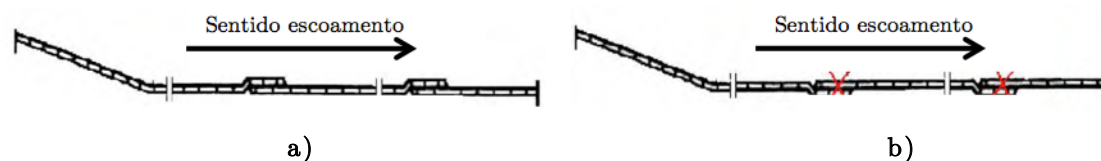


Figura 31- Sentido de colocação da sobreposição na zona basal: a) posicionamento correto; b) posicionamento incorreto (Barroso & Lopes, 2008).

As soldadura podem ser realizadas por quatro métodos: extrusão, termofusão, colagem e colagem química (Yin & Shukla, 2006). Os métodos de colagem e colagem química não se aplicam a geomembranas constituídas pelo polímero de polietileno, não sendo, assim, aprofundados no âmbito do presente trabalho.

A soldadura por termofusão consiste no aquecimento das superfícies da geomembrana a uma temperatura superior ao seu ponto de fusão, sendo posteriormente as superfícies juntas por pressão, de forma a obter-se uma conexão uniforme. Este tipo ligação pode ser feita de duas formas: por cunha ou por ar quente, sendo a principal diferença a forma como se impõe o aquecimento da geomembrana (Müller, 2007).

A soldadura por extrusão, consiste na deposição de material fundido, constituído por um polímero semelhante ao da geomembrana, na extremidade do painel superior (McBean, Rovers, & Farquhar, 1995).

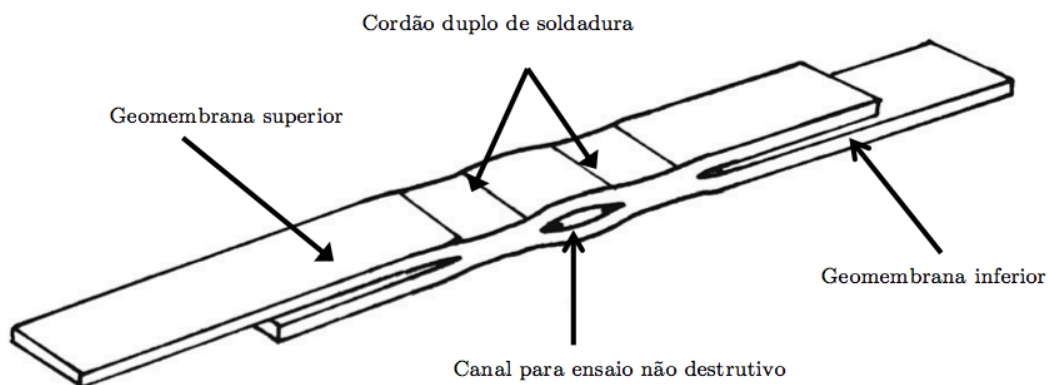


Figura 32-Soldadura por termofusão (dupla) (adaptado de (Müller, 2007)).

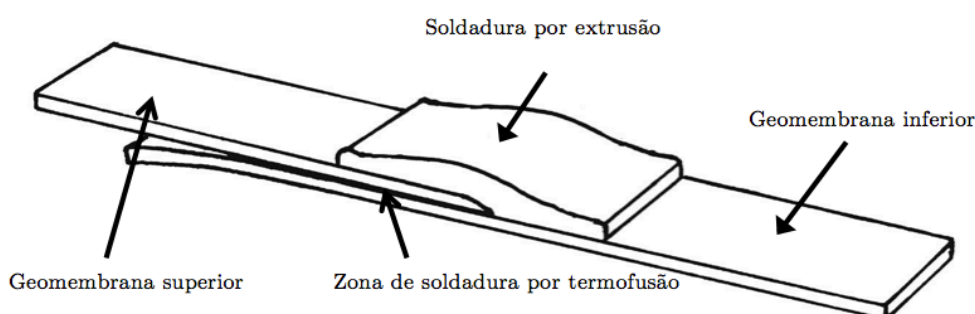


Figura 33 – Soldadura extrusão (adaptado de (Müller, 2007)).

Convém salientar que, para a execução das soldaduras acima referidas, é necessária uma largura de sobreposição adequada, sendo recomendado o valor de 10 cm e 7,5 cm para termofusão e extrusão, respetivamente (Duarte, 2009).

Em aterros de resíduos, o tipo de soldadura que se deve utilizar é a soldadura por termofusão dupla, sendo apenas recomendada a utilização da soldadura por extrusão em pontos críticos tais como para execução de remendos e ligação entre a geomembrana e tubagem em zonas em que esta trespassa o sistema de impermeabilização. A opção pelo uso deste tipo de soldadura acontece devido à maior fiabilidade associada ao seu processo de execução, sendo que o processo de execução de soldaduras por extrusão é mais suscetível a erros, devendo ser executado por operadores experientes (Barroso & Lopes, 2008).

À semelhança de outros processos já referidos, a execução de soldaduras requer alguns requisitos, devendo garantir-se que:

- A zona de sobreposição se encontra limpa, seca e sem rugas;
- A soldadura é executada a temperaturas adequadas (nunca abaixo de 10°C e nunca acima de 40°C);

- A soldadura não é executada em condições climatéricas de chuva, humidade ou vento;
- A sobreposição de painéis possui a largura adequada para a realização da soldadura;
- A execução de soldaduras em taludes é feita paralelamente à linha de maior declive.

Soldadura por termofusão

A soldadura por termofusão (cunha quente), consiste na colocação de uma cunha de aquecimento, montada sobre roletes autopropulsionados, entre as geomembranas a unir, que proporciona o aquecimento das mesmas acima do ponto de fusão do seu polímero. A união dos painéis de geomembrana é conseguida pela aplicação de pressão superior e inferiormente, forçando as superfícies a formar uma ligação permanente (Yin & Shukla, 2006).

A execução desta soldadura contempla dois tipos de processo, o térmico e o reológico. No processo térmico dá-se a fusão do material, ao passo que no processo reológico se promove a ligação das interfaces do material fundido, através da aplicação de pressão (Yin & Shukla, 2006).

A fusão do material dá-se devido ao aquecimento da cunha que, no caso de soldadura dupla, possui duas faixas de aquecimento, como esquematizado na Figura 34. Entre as duas faixas é criado um canal através do qual se realiza posteriormente o ensaio não destrutivo de pressão, de forma a verificar a estanqueidade da soldadura.

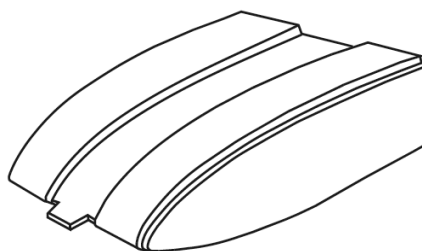


Figura 34 – Esquema cunha dupla faixa (Müller, 2007).

A união das superfícies fundidas acontece devido à pressão exercida por um conjunto de rolos instalados imediatamente atrás da cunha como demonstra a Figura 36.

Para a execução de soldaduras por termofusão recorre-se à utilização de uma máquina automática de solda por cunha quente. O tipo de máquina a utilizar pode variar em função da espessura da geomembrana, bem como com o tipo e tamanho da obra a realizar. Estas máquinas possuem um controlo automático que permite a execução da soldadura de

forma autónoma, sendo apenas indicada a velocidade, a temperatura e a pressão de execução.

A temperatura e velocidade de soldadura são controlados por um controlador, que as mantem constantes ao longo da soldadura, independentemente da inclinação da camada de suporte. A temperatura de soldadura é determinada pela temperatura da cunha, que se mantem a uma temperatura superior à de fusão do material, geralmente encontrando-se no intervalo de 300 a 400°C (Müller, 2007).



Figura 35 – Exemplo de maquina de soldadura por termofusão por cunha (www.directindustry.com)

Outro aspeto importante no processo de soldadura é a pressão aplicada para a junção dos painéis de geomembrana, que tal como a temperatura e velocidade é constante ao longo da soldadura e é definida em função do tipo de polímero constituinte da geomembrana a ser soldada (Müller, 2007).

Tabela 13 –Caraterísticas maquinas de soldadura por extrusão (ENGEPOL).

Espessura da geomembrana	0,8 a 2,0 mm	1,5 a 5 mm
Tensão / potência	220 V / 2.200 W	220 V / 5.800 W
Peso	4,7 a 7,5 kg	12,5 a 32 kg
Temperatura ajustável	20 a 600° C	20 a 650° C
Velocidade ajustável	0 a 3,5 m/min	1 a 5 m/min

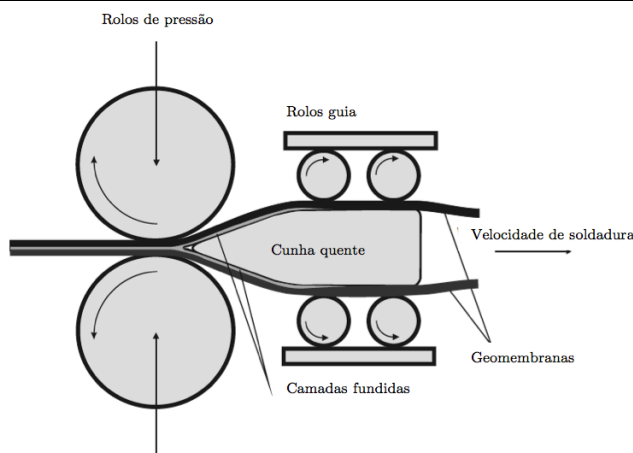


Figura 36-Representação esquemática execução de soldadura termofusão por cunha (Müller, 2007).

Os principais parâmetros referentes à soldadura estão diretamente relacionado com os componentes acima mencionados, dependendo da temperatura e comprimento da cunha, da pressão dos rolos e da velocidade da soldadura.

Antes da execução da soldadura deve:

- Proceder-se aos ajustes necessários no posicionamento da membrana;
- Verificar e ajustar a máquina de soldadura;
- Proceder-se à preparação das sobreposições, nomeadamente através da sua limpeza, corte e rebarbagem.

Concluída a soldadura, deve proceder-se ao corte dos excessos de materiais e à execução de ensaios de forma a verificar a qualidade da soldadura.

Soldadura por extrusão

As soldaduras por extrusão podem ser realizadas de duas formas: manualmente ou através de máquina extrusora. O processo manual para este tipo de soldadura é normalmente de uso limitado, sendo apenas aplicado em zonas de ajustes, de difícil acesso ou em reparações. Assim sendo, para a realização deste tipo de soldadura, recorre-se correntemente ao uso de máquina extrusora. O funcionamento desta máquina consiste na plastificação (fundição) de material inserido, por meio de calor ou cisalhamento, sendo este posteriormente forçado a sair através de um orifício na sapata de PTFE existente na base da mesma. O material fundido ao sair pela sapata de PTFE é pressionado contra a zona a aplicar, constituindo um cordão de solda. A velocidade de execução da soldadura depende da quantidade de material fundido expulso.

O material a utilizar na alimentação da extrusora deverá ser constituído pelo mesmo polímero que constitui a geomembrana, podendo apresentar-se na forma granular ou sob a forma de cordão.

Associada à extrusora surge uma fonte de ar quente que pode integrada na própria máquina ou externa. Esta fonte de ar quente tem por objetivo a execução de um pré-aquecimento da geomembrana, de forma a facilitar a aderência entre esta e o material fundido (Müller, 2007).

Neste tipo de soldadura, devem ser controladas as temperatura do material de aplicação e do ar quente utilizado no pré-aquecimento das geomembranas.

A execução de uma soldadura deste tipo requer:

- Limagem da face da aresta da membrana superior de forma a criar um ângulo de 45°;

- A picotagem das geomembranas por ar quente antes da soldadura, de forma a evitar que estas se separem.

Na execução da soldadura, a pressão de soldadura a aplicar deve ser tal, que não permita o repuxamento das bordas do cordão extrudido.

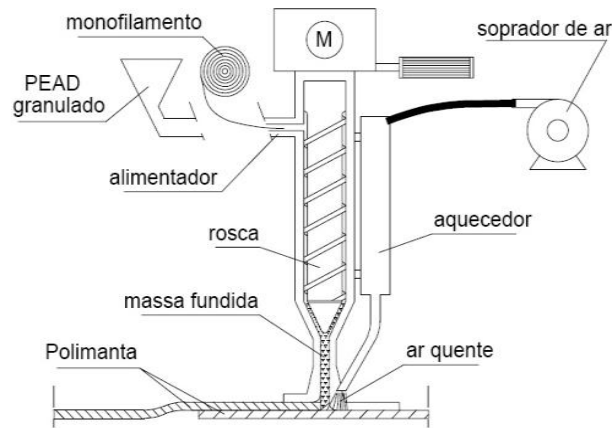


Figura 37 – Representação esquemática da extrusora (adaptado de (Müller, 2007)).

No caso em estudo, a soldadura por extrusão será utilizada apenas nas zonas onde o sistema de recolha de lixiviados periférico à célula de confinamento trespassa o sistema de impermeabilização da mesma.

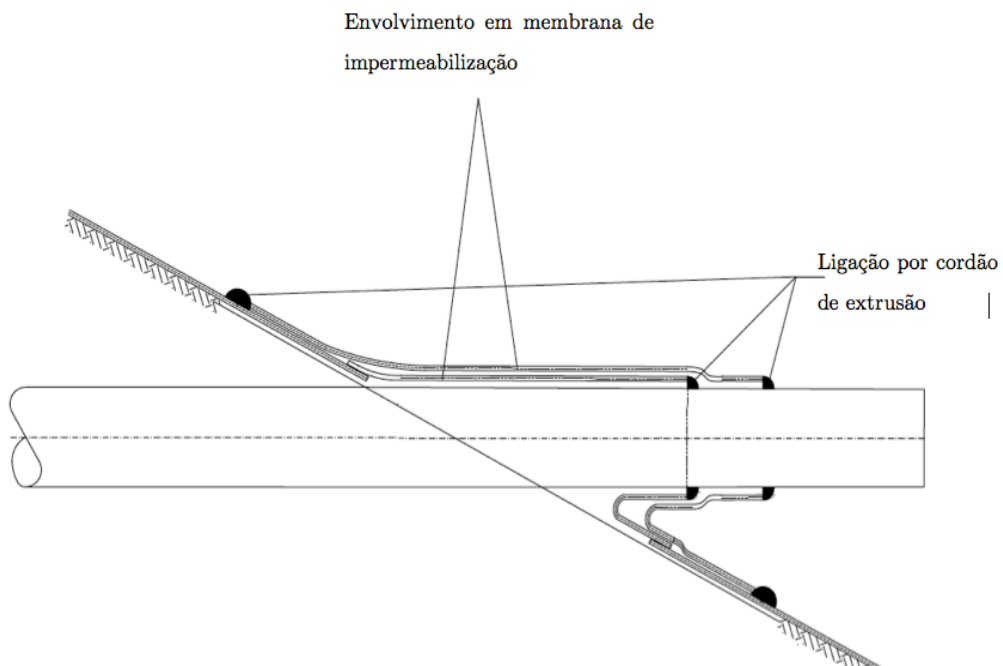


Figura 38- Pormenor de soldadura na intersecção da tubagem com sistema de impermeabilização, zona de talude.

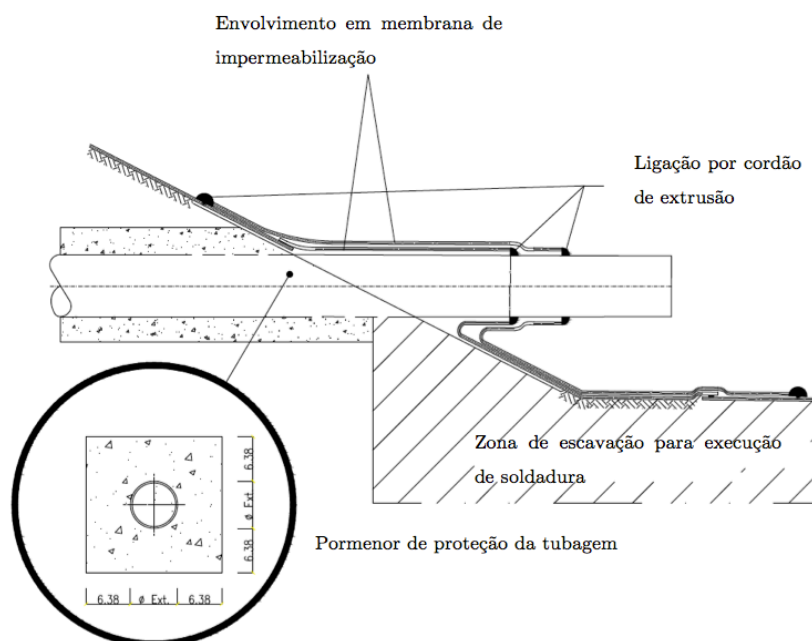


Figura 39 - Pormenor de soldadura na intersecção da tubagem com sistema de impermeabilização, zona de septos de separação de alvéolos.

Estas zonas localizam-se, na célula, nas intersecções do sistema de drenagem de lixiviados situado na periferia da mesma com o sistema de impermeabilização (Figura 38) e na travessia dos septos de divisão de alvéolos por parte do sistema de drenagem de lixiviados da zona basal (Figura 39).

A execução de soldaduras nesta zona é feita com recurso a máquina extrusora, devendo o modo de execução ser o demonstrado na Figura 38 e Figura 39. É de salientar que, na soldadura executada na zona dos septos, existe uma zona de escavação. Esta zona é definida de forma a permitir a soldadura na parte inferior da tubagem.

Soldadura com máquina de ar quente

A soldadura por ar quente, é normalmente utilizada apenas para a execução de remendos ou para execução de ponteados utilizados na fixação prévia das geomembranas. O processo de soldadura consiste na injeção de um fluxo de ar quente, que provoca a fusão das superfícies dos painéis a unir. Após a fusão das superfícies é aplicada pressão manual, através de rolos de silicone, que une as superfícies dos painéis (Yin & Shukla, 2006).

Este tipo de soldadura utiliza, como já referido, uma máquina de ar quente. Estas máquinas são constituídas por um gerador de ar quente que produz um fluxo de ar com temperatura e vazão passível de ser controlada. A versatilidade deste tipo de máquina é conseguida com uma série de acessórios como os indicados na Figura 40.

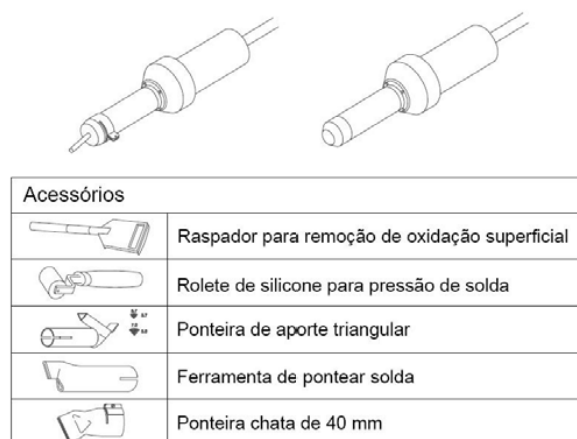


Figura 40 – Acessórios utilizados na execução de soldadura por termofusão com recurso a máquina de ar quente (Neoplastic).

3.3.4. Geotêxtil

Os equipamentos utilizados na aplicação de geotêxteis são semelhantes aos utilizados para a aplicação do geocompósito e geomembrana.

A aplicação destes deve ser efetuada, à semelhança dos geossintéticos já referidos, no sentido da máxima inclinação dos taludes. No caso em estudo, o geotêxtil será apenas instalado sobre a geomembrana na zona basal, de forma a protegê-la das ações provocadas pela camada drenante.

A instalação do geotêxtil consiste no desenrolar dos rolos do geossintético sobre a superfície desejada, devendo na sua colocação precaver-se a largura da faixa de sobreposição de painéis de acordo com o tipo de acabamento a dar a união de painéis subjacentes.

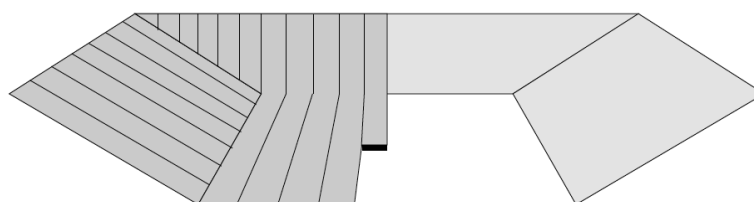


Figura 41 – Método de aplicação do geotêxtil de proteção (Neoplastic).

As juntas criadas entre painéis podem ser “seladas” por processos tais como união por calor, sobreposição, por costura ou agrafamento e colagem química através de adesivos (Yin & Shukla, 2006).

A união por calor requer equipamento específico, tal como máquina de ar quente ou de termofusão. Este tipo de soldadura requer, para além de uma base apoio para os painéis, uma superfície limpa e seca, não sendo, por isso, a solução mais aconselhável para execuções “*in situ*”. Para a execução desta soldadura, na aplicação do geotêxtil, deve ser deixada largura mínima de sobreposição de 150 mm.

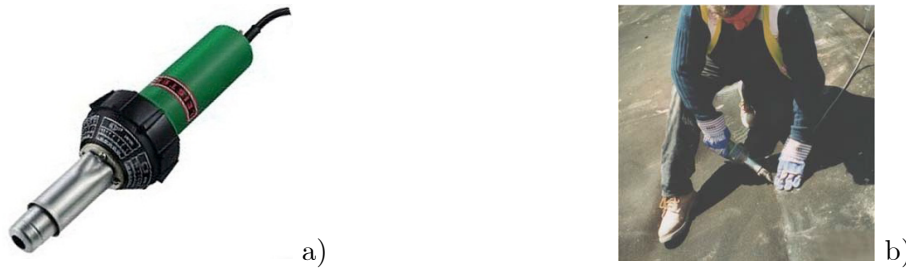


Figura 42 – Soldadura com pistola de ar quente : a) pistola de ar quente; b) execução de soldadura (Neoplastic)

A união por sobreposição consiste na sobreposição das extremidades de painéis adjacentes como demonstrado na Figura 43. Este tipo de junta permite a criação de uma faixa ao longo das extremidades dos painéis, denominada por largura de sobreposição.

Sobreposição simples



Figura 43– Junta selada por sobreposição (adaptado de (Geosynthetics, 2

Esta largura de sobreposição varia de caso para caso, nomeadamente com as condições de aplicação e cargas a que o geossintético ficará sujeito. Geralmente, para casos em que as forças de tração aplicadas ao geossintéticos apresentem valores baixos, podem considerar-se valores para a largura de sobreposição no intervalo de 0,3 - 1m (Yin & Shukla, 2006).

A largura da faixa a sobrepor, como varia em função do projeto e a função a que o geossintético se destina, deve ser sempre definida no projeto.

A ligação de painéis através de costura pode ser feita de duas formas, por costura simples ou oração (Figura 44 a)) ou por costura em J (Figura 44 b)), podendo ainda estas ser constituídas por linhas de costura simples ou duplas, de acordo com a resistência que se pretende adequir.

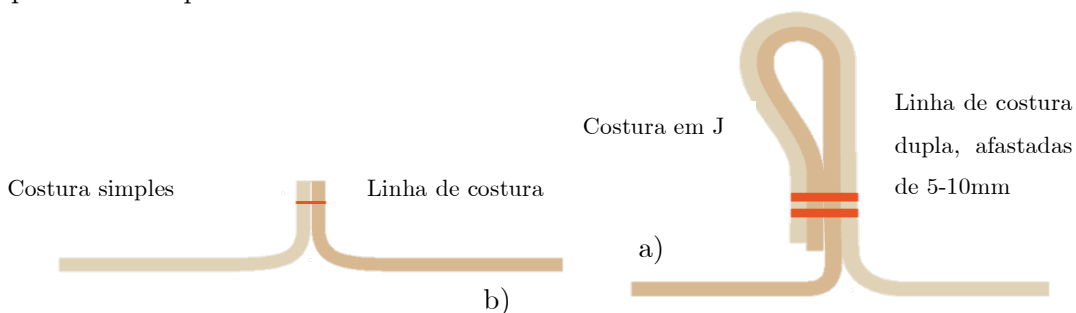


Figura 44 – União por costura : a) costura simples ou oração; b) costura em J (adaptado de (Geosynthetics, 2012)).

A união de painéis subjacentes de geotêxtil executada por costura, principalmente no caso de obras como o caso de estudo, requer algumas precauções, nomeadamente na escolha do fio com que se executará a costura. A escolha deste é importante, pois estará sujeita às mesmas condições ambientais que o geotêxtil, devendo possuir durabilidade semelhante ou melhor que este. Geralmente, são utilizados dois tipos de linhas: de polipropileno e poliéster, devendo o fabricante ser consultado, de forma a que se utilize a mais conveniente para o caso (Yin & Shukla, 2006).

Outra preocupação inerente a este processo é a localização da costura, que deverá ser de entre 10 a 20 mm da borda do painel, no caso deste possuir acabamento na extremidade. Caso não o possua, o geotêxtil deve ser dobrado, criando uma dupla camada, podendo a costura localizar-se a uma distância de 10 a 15 mm da extremidade dos painéis.

O equipamento para a execução destas costuras são máquinas de costura portáteis como a ilustrada na Figura 45, o que permite um fácil manuseio sem comprometer a qualidade da costura.

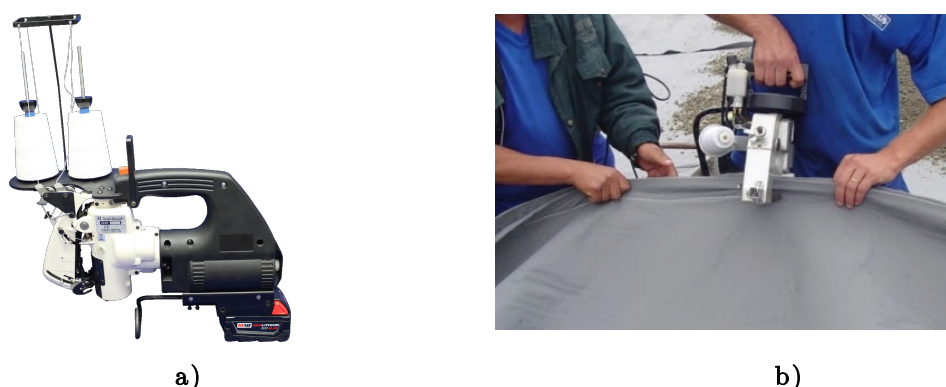


Figura 45- Costura por fio: a) máquina de costura; b) exemplo de execução da costura
(<http://www.texindsls.com/sewing>).

A ligação de painéis de geotêxtil realizada por costura por agrafamento, segue os mesmos moldes da costura anteriormente apresentada, sendo que recorre a agrafos, em vez de fio para promover a união dos painéis.

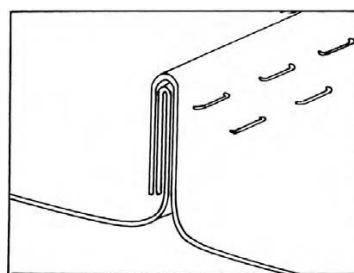


Figura 46 –Costura por agrafamento.

Este tipo de ligação é geralmente utilizado em geotêxteis apenas para juntas temporárias, devido à baixa fiabilidade comparativamente à ligação por costura por fio (Yin & Shukla, 2006).

As ligações por colagem recorrem a adesivos químicos para garantir a ligação entre painéis. Como este tipo de ligação não é normalmente utilizado, não serão aprofundados os seus processos de execução.

Nos casos em que se proceda à união por soldadura ou costura, após a aplicação dos painéis de geotêxtil, é aconselhável a colocação de sacos de areia ou outros elemento que não danifiquem o geossintético, de forma a evitar a sua movimentação por ação do vento.

Caso o geotêxtil seja danificado na sua colocação, a reparação do mesmo deverá ser feita com recurso ao mesmo tipo de material, sendo que a peça a colocar sobre a zona danificada deve ser sobreposta numa largura de 30 cm para cada lado e colocada na mesma direção da do fabrico do geotêxtil, sendo unida por calor de forma a evitar a sua deslocação.

3.4. Controlo de qualidade do sistema de impermeabilização

A garantia do controlo da qualidade em todas as fases do processo de concepção de um aterro de resíduos, influencia fortemente o desempenho final da infraestrutura. O processo de controlo da qualidade implica custos avultados, correntemente associados a observações e realização de ensaios. No entanto, a implementação de medidas que visem a garantida da qualidade, nomeadamente na fase de construção, permitem uma minimização de custos posteriores associados a reparações e processos judiciais inerentes a problemas ambientais.

Posto isto, importa perceber como é realizado o controlo da qualidade nas três principais fases de concepção da infraestrutura, a fase de projeto, construção e exploração.

Na fase de projeto, este controlo é executado com o recurso à verificação por parte deste do cumprimento dos regulamentos em vigor, da verificação da conformidade com o caderno de encargos, e do cumprimento dos requisitos para o tipo de obra em causa. A verificação destes requisitos é, normalmente, conseguida com base nos estudos geológicos, hidrogeológicos, de risco sísmico, estabilidade, entre outros, realizados em fase posterior.

Na fase de construção, a garantia da qualidade prende-se com a averiguação da conformidade das técnicas e materiais utilizados com o preconizado no projeto de execução e especificações regulamentares.

Da mesma forma que nas fases precedentes, o controlo da qualidade na fase de exploração é feito com recurso à verificação do cumprimento das medidas regulamentares e definidas

em projeto, sendo todos os parâmetros analisados e controlados com recurso a um processo de inspeção e monitorização.

A implementação de ações de controlo e garantia da qualidade é um processo complexo, sendo necessária a elaboração de um plano. Este plano, designado de Plano de Garantia da Qualidade de Construção (GQC), apresenta pontos objetivos, onde são definidos os intervenientes em cada fase e as suas responsabilidades, as recomendações para uma construção com qualidade, os documentos e relatórios de carácter obrigatório para que se evidenciem a garantia da qualidade na construção, bem como o plano de ensaios a realizar, e assegurar o cumprimento das condições definidas no projeto. Assim sendo, dada a complexidade do processo e o âmbito do presente trabalho, serão apenas expostas as ações inerentes ao controlo da qualidade da construção do sistema de impermeabilização da célula de confinamento e lagoas de efluente e pluviais do caso em estudo.

Numa primeira fase, e de forma a tornar mais perceptível o funcionamento do plano de garantia da qualidade, interessa mencionar os intervenientes no processo e as suas responsabilidades. Posto isto, os intervenientes são:

- Dono de obra: responsável pelas operações a executar, bem como pela nomeação da entidade fiscalizadora, que o representará na fase de execução do projeto;
- Projetista: responsável pelo projeto e especificações técnicas;
- Empreiteiro: responsável pela execução dos trabalhos;
- Fabricante: responsável pela produção dos materiais a aplicar;
- Instalador: responsável pelo processo de instalação dos materiais, no caso geossintéticos, sendo consideradas neste processo as ações de transporte, armazenamento, manuseamento, e aplicação destes;
- Entidade fiscalizadora: responsável pela execução da inspeção, realização de ensaios e relatórios, com ações de controlo e garantia da qualidade de execução da construção;
- Entidade licenciadora: responsável pelo controlo da qualidade na fase de projeto, através da verificação do cumprimento dos requisitos legais.

O cumprimento das responsabilidades inerentes a cada interveniente assume grande importância no processo de garantia da qualidade. No entanto, o ponto mais relevante e por vezes mais difícil de garantir é a correta interação entre os intervenientes, a qual se poderá tornar no principal entrave no cumprimento do plano de garantia da qualidade.

3.4.1. Garantia da qualidade da construção da barreira geológica natural.

A barreira geológica natural, como já referido, é composta por material proveniente da escavação da célula de confinamento, sendo o material escavado submetido a um processo de britagem e aplicado em camadas de 0,20 m devidamente compactadas, até perfazer uma espessura total de 0,50 m. Em termos de garantia de qualidade, para a camada definida, importa controlar a utilização do material, verificando se se trata do mais apropriado para a função a que se destina, e a metodologia de aplicação.

O primeiro passo a verificar na garantia de uma correta execução da barreira geológica natural é a averiguação da conformidade do material a ser aplicado.

A verificação da conformidade do material a aplicar é garantida com recurso à realização de ensaios a amostras recolhidas em diferentes pontos da zona de escavação do material. A entidade responsável pela garantia da qualidade, a fiscalização, deve efetuar um registo das amostras recolhidas, que deve conter a localização e a data da recolha, de forma a identificar as zonas de possíveis não conformidades. A frequência com que devem ser realizados os ensaios é, normalmente, de 1 por cada 5000 m³ de material. No entanto, esta frequência pode ser alterada pela fiscalização no caso de se verificarem variabilidades nos materiais, tais como a presença de material de má qualidade ou a utilização de material previamente sujeito a condições climatéricas adversas.

Assim sendo, as amostras de material, são normalmente submetidas a análises granulométricas, a ensaios de determinação dos limites de Atterberg e teor em água, bem como ensaios de compactação.

Tabela 14- Ensaios ao solo.

Ensaio	Norma
Classificação do solo	ASTM-D-2487 / E 240 (LNEC)
Teor em água	NP 84
Limites de Atterberg	ASTM-D-4318 / NP 143
Análise granulométrica	ASTM-D-422; E 239 (LNEC)
Proctor normal	ASTM-D-698; E 197 (LNEC)
Proctor modificado	ASTM-D-1557; E 197 (LNEC)
Permeabilidade	ASTM-D-5084

Adaptado de (Carreira & Cabeças, 2002)

Após a realização dos ensaios às amostras colhidas, compete à fiscalização, com base nos resultados obtidos, decidir se o material pode ou não ser utilizado. A título de exemplo, apresenta-se em anexo os o boletim de ensaios realizados a uma amostra de material do caso em estudo.

O processo precedente à colocação do material deve ser a preparação da superfície que o irá receber, devendo para esta superfície verificar-se:

- A cota a que se encontra a superfície, de forma a garantir que a escavação atingiu o ponto previsto em projeto;
- A preparação da base para a recepção do material, nomeadamente, a verificação da não existência de solos inadequados.

Verificada a conformidade da base onde assentará o material da barreira geológica, procede-se ao controlo da colocação do material, sendo visados essencialmente:

- A garantia do correto transporte e deposição, nomeadamente através da utilização de equipamentos adequados;
- A garantia da permanência das características do material utilizado durante o processo de aplicação, sendo o teor em água o ponto mais importante;
- A garantia do espalhamento de acordo com a espessura definida para as camadas, sendo no entanto adequado durante o espalhamento garantir uma espessura mais elevada que a definida para a camada, de forma a assegurar a espessura correta após o processo de compactação;
- A garantia de utilização de equipamentos adequados;
- A garantia do ajuste do teor em água através da adição de água, sempre que se mostrar necessário.

Após a colocação de cada camada de material, dever proceder-se à compactação da mesma, devendo verificar-se:

- A utilização de equipamento adequado para o efeito, devendo este equipamento promover a eliminação ou a redução do tamanhos dos torrões presentes;
- Que a compactação se realiza sob condições climatéricas favoráveis;
- Que o número de passagens do equipamento compactador é o indicado para a atingir a compactação desejada;
- Que em cada passagem do equipamento, foi coberta a totalidade da superfície da camada ;
- Que a camada possui a espessura definida, após a compactação;
- Que é realizado o alisamento da superfície da camada ao fim de cada dia de trabalho, de forma a evitar a acumulação de água proveniente da precipitação, que afetaria a uniformidade do teor em água da camada.

O processo de compactação das camadas de solo a colocar, deve ser acompanhado pela entidade fiscalizadora, através da elaboração de registos diários, onde se devem incluir, os esquemas de compactação, a data da sua realização, as condições climatéricas aquando do ensaio, o equipamento utilizado e as condições sob as quais se realizou o processo. O controlo do número de passagens do equipamento de compactação deve ser realizada pela entidade responsável pela fiscalização, devendo realizar-se pelo menos uma observação por cada 3000 m² de camada.

A aplicação do material constituinte da barreira geológica natural no caso em estudo, devido à sua dimensão, é um processo moroso, estando as camadas sujeitas, embora que temporariamente, a condições externas que podem comprometer a qualidade de execução da mesma, sendo para tal, para além do alisamento já referido, necessário a execução de uma rega periódica para garantir o teor em água para o caso de exposição a calor intenso. A verificação de todos os parâmetros referidos é feita com recurso a uma série de ensaios, de forma a aferir que os processos e equipamentos utilizados levaram, ou não, à execução de uma barreira que cumpre os requisitos para os quais foi projetada. Para tal, são controlados os parâmetros descritos Tabela 15 através dos ensaios definidos, também, na mesma tabela.

Tabela 15- Parâmetros a controlar na execução das camadas.

Parâmetro	Ensaio	Norma	Frequência de ensaio
Teor em água (determinação rápida)	Gamadensímetro	ASTM-D-3017	1 ensaio por cada 1000 m ² de camada
Teor em água	Método da estufa	ASTM-D-2216 NP 84	1 ensaio por cada 10 determinações rápidas
Peso volúmico (determinação rápida)	Gamadensímetro	ASTM-D-2922	1 ensaio por cada 1000m ² de camada
Peso volúmico	Garrafa de areia	ASTM-D-1556; E 199 (LNEC)	1 ensaio por cada 10 determinações rápidas
Espessura da camada			1 ensaio por cada 400m ² de camada

Adaptado de (Carreira & Cabeças, 2002)

No caso em estudo, a determinação do peso volúmico seco e do teor em água no solo foram feitas unicamente com o recurso ao método de determinação rápida, com o uso do gamadensímetro, sendo, no entanto, aconselhável - com a frequência definida na Tabela 15 - a execução de ensaios de calibração com recurso a métodos alternativos, tais como o método da garrafa de areia e o método da estufa. A execução destes ensaios de “despiste” é aconselhável devido à possibilidade de ocorrência de desvios no método do gamadensímetro, inerentes às características do solo (composição química), à proximidade

de objetos relativamente ao aparelho, bem como à colocação errada do aparelho sobre a superfície.



Figura 47 - Execução do ensaio de determinação do peso volúmico/teor em água (gamadensímetro).

Os pontos de amostragem podem ser escolhidos aleatoriamente. No entanto, devem seguir a frequência estabelecida nas especificações de definidas em projeto.

O controlo da espessura das camadas de solo no caso de estudo foi feito com o recurso à instalação de estacas de reperfilamento, com espaçamento adequado, sendo colocado um fio a unir estacas adjacentes, de forma a garantir que a espessura da camada não varia nesse intervalo. Embora se definam espessuras para as camadas que devem ser respeitadas, são, no entanto, admitidas variações destas, desde que não ultrapassem o valor estipulado em mais de 5 %.

Uma situação que pode ser verificada após a aplicação do material é a ocorrência de zonas com anomalias. Estas anomalias prendem-se, normalmente, com alterações do teor em água e do peso volúmico do solo, levando à necessidade de se proceder a uma reparação da camada.

Esta reparação pode passar por uma recompactação, caso o teor em água seja elevado e o peso volúmico apresente valores baixos, ou por uma escarificação da camada com posterior compactação para valores baixo de teor em água e peso volúmico elevado.

3.4.2. Garantia da qualidade de aplicação de geossintéticos

A escolha dos geossintéticos a utilizar no sistema de impermeabilização é feita de acordo com as características definidas para estes em projeto, comparando os valores destas características com as definidas nas fichas técnicas dos produtos fornecidas pelos fabricantes. No entanto, esta escolha pode ser condicionada por questões normativas, quando as normas de ensaio utilizadas pelo fabricante divergem das normas referidas nas especificações do projeto, e pelas diferenças nas considerações dos valores especificados,

sendo que em projeto são, normalmente, definidos os valores mínimos admissíveis, e nas fichas técnicas são facultados, normalmente, valores médios.

A qualidade dos geossintéticos, devido ao seu processo de fabrico e material utilizado, pode ser muito variável, sendo, por isso, necessária uma avaliação e um controlo da qualidade de fabrico, antes da aprovação para a sua utilização.

3.4.2.1. Geomembrana

A qualidade de fabrico das geomembranas prende-se com a qualidade do polímero utilizado neste processo. Posto isto, a qualidade de uma geomembrana pode ser evidenciada através da informação fornecida pelo fabricante, nomeadamente pelo fornecimento do certificado de controlo da qualidade do produto, emitido por uma entidade independente, e pelo documento emitido pelo fabricante que comprova o controlo da qualidade do material fornecido.

Aceitação

Após o fornecimento, a entidade fiscalizadora, deverá aferir se o geossintético se encontra devidamente marcado, devendo este conter:

- Nome do produtor;
- Informação do produto;
- Número de lote;
- Número de rolo;
- Dimensão e peso do rolo.

Para além da averiguação da marcação dos rolos, a entidade fiscalizadora, após a recepção mas antes da aceitação do produto, deve proceder a uma análise da conformidade e realizar ensaios para a verificação da conformidade das características do produto com o definido em projeto.

Relativamente à análise da conformidade deve ser verificada:

- A marcação e a informação contida em cada rolo;
- A marcação CE em cada unidade;
- A conformidade dos materiais relativamente aos previamente aprovados;
- Se a referência à norma europeia para a aplicação se encontra em cada rolo;
- A conformidade do produto com o pedido de compra e guia de transporte.

De acordo com a marcação CE, a entidade fiscalizadora deve verificar a validade do documento de acompanhamento, e declaração de conformidade, bem como proceder à revisão dos resultados dos ensaios de controlo de produção, fornecidos pelo fabricante.

Outro aspeto importante nesta fase é a realização de ensaios de verificação da conformidade, de forma a assegurar a conformidade das características do geossintético relativamente aos valores estabelecidos em projeto.

Caso não sejam disponibilizados os resultados dos ensaios de controlo de produção, devem ser recolhidas amostras em conformidade com o descrito na norma CEN TR 15019 e respeitando as regras relativas a amostragem definidas na norma NP EN ISO 9862 (amostragem e preparação de provetes), para a realização de ensaios. Os ensaios a realizar devem englobar todas as características importantes para a garantia de um bom desempenho do geossintético.

Após a verificação dos resultados dos ensaios de verificação da conformidade, a fiscalização decide sobre a aceitação ou rejeição do geossintético, podendo, ainda, ser requeridos ensaios adicionais, no caso de rejeição, aos rolos com numeração adjacente ao rejeitado, podendo, em caso de resultado negativo, ser rejeitada a totalidade do lote.

- **Transporte, manuseamento e armazenamento**

Os processos de transporte, manuseamento e armazenamento requer também algum cuidado, sendo que nos dois primeiros deve garantir-se a utilização de equipamento adequado para o transporte, não devendo ser permitido empurrar, arrastar ou promover o escorregamento dos rolos de geossintético durante o seu manuseamento.

O processo de recepção dos geossintéticos em obra, contempla também o armazenamento dos mesmos, que deverá ser feito de forma a evitar a degradação da qualidade destes devido a ações climáticas, danos mecânicos, sujidade e vandalismo. Para que o armazenamento possa garantir que as características dos geossintéticos se mantêm inalteradas devem verificar-se os seguintes requisitos:

- Preparação adequada da superfície de colocação (ausência de pedras ou materiais passíveis de danificar o geossintético e ausência de água);
- Quando não for possível a verificação do ponto anterior, é obrigatória a colocação dos rolos sobre paletes de madeira;
- O empilhamento dos rolos deve seguir o definido pelo fabricante.

Caso não sejam indicadas especificações relativas ao empilhamento, este não deve exceder uma altura de cinco níveis de rolos, sendo que, caso se verifique que o geossintético se encontra acondicionado de forma inadequada, deve excluir-se o material danificado, normalmente o primeiro nível, e utilizar apenas o material intacto.

- **Controlo da qualidade de instalação**

O primeiro passo no processo de garantia da qualidade de instalação de geossintéticos, prende-se pela garantia da qualidade da superfície de apoio. Como já referido aquando da

exposição da metodologia de instalação da geomembrana, esta será aplicada sobre o geocompósito bentonítico, garantindo, assim, uma boa superfície para a receber. No caso da geomembrana ser aplicada sobre solo, devem verificar-se o nivelamento e compactação da camada, bem como a presença de materiais passíveis de introduzir danos na geomembrana. Outra preocupação no processo de instalação é a zona de ancoragem dos geossintéticos. Como referido no ponto onde é exposta a metodologia de amarração dos geossintéticos, esta ancoragem é feita com recurso a valas, que são dimensionadas tendo em consideração as inclinações dos taludes e a interação entre os diferentes geossintéticos. Na fase de construção, durante a aplicação da geomembrana deve verificar-se, na vala de amarração, que:

- O carregamento provisório é suficiente para evitar o escorregamento da geomembrana e a conseqüente formação de dobras no pé do talude;
- Esta possui as dimensões corretas e a sua localização se encontra de acordo com o especificado no projeto;
- Esta se encontra arredondada nos cantos, de forma a evitar possíveis danos na geomembrana;
- Não existe solo solto entre a superfície do geossintético e superfície da vala;
- O material a colocar como enchimento não causa danos na geomembrana, sendo que no caso em estudo, este se encontra envolto em geotêxtil, garantindo a proteção da geomembrana;

A colocação dos painéis de geomembrana deve também obedecer a alguns requisitos de forma a garantir a qualidade da sua instalação, no entanto estes foram já referidos na exposição do processo de aplicação da geomembrana.

O ponto mais importante no processo de controlo da qualidade da aplicação de uma geomembrana passa pela garantia de qualidade inerente aos métodos executados na união de painéis. Estes métodos foram já especificados anteriormente, sendo apenas abordados os parâmetros que devem ser controlados para a garantia da qualidade.

Assim sendo, no processo de soldadura por termofusão, devem ser aferidos os seguintes requisitos:

- Temperatura de fusão e temperatura ambiente em intervalos regulares;
- A utilização do equipamento de soldadura não provoca danos na geomembrana;
- A proteção da geomembrana de ações tais como o tráfego.

No processo de soldadura por extrusão, os itens a controlar são:

- Temperatura de soldadura e temperatura ambiente em intervalos regulares;
- A utilização do equipamento de soldadura não provoca danos na geomembrana;

Todos os restantes requisitos a verificar, tais como condições das zonas de soldadura, condições para a realização desta, identificação e registo, foram também já mencionados aquando de exposição dos métodos de soldadura a utilizar.

Para garantir a qualidade das uniões executadas pelos processos descritos, é necessário, para além de garantir todas as condições necessárias para a sua realização, a realização de ensaios que permitam aferir a sua estanquidade e a sua resistência.

É importante referir que, antes da execução da soldaduras, é necessária a execução de ensaios de pré-qualificação em amostras executadas em condições semelhantes às que serão verificadas na execução das soldaduras. As amostras utilizadas na realização destes ensaios são normalmente faixas com 1 x 0,25 m para o processo de extrusão, e faixas de 0,50 x 0,25 m para o processo de termofusão. Das amostras preparadas são selecionados quatro provetes para a realização de testes de arranque e de corte, sendo a execução da soldadura autorizada apenas se os valores obtidos nos ensaios igualem ou excederem as especificações de projeto.

Este tipo de ensaio deve ser realizado diariamente, de forma a que as amostras se realizem em condições semelhantes às de execução das soldaduras.

- **Ensaio às soldaduras**

Os ensaios às soldaduras podem ser de dois tipos: não destrutivos ou destrutivos, sendo estes utilizados para verificar sua a estanquidade e resistência.

Ensaio não destrutivos

Relativamente aos ensaios não destrutivos, estes podem ser realizados pelo instalador, podendo ser ensaios de pressão de ar (termofusão), e ensaios de vácuo ou ensaios de fio de cobre (extrusão).

Tabela 16- Ensaio não destrutivos e respetivas normas (Barroso & Lopes, 2008).

Ensaio	Norma
Pressão de ar comprimido	ASTM-D-5820
Vácuo	ASTM-D-5641
Fio de cobre	-

O ensaio de pressão de ar consiste na pressurização do canal central da soldadura dupla realizada por termofusão, através da injeção de ar, sendo verificada a existência, ou não, de variações na pressão instalada. A pressão de ar aplicada varia essencialmente em função da espessura da geomembrana.

Tabela 17-Gama de pressões para ensaio de ar comprimido em geomembranas (adptado (Barroso & Lopes, 2008)).

Espessura geomembrana (mm)	Pressão mínima (kPa)	Pressão máxima (kPa)	Queda admissível (kPa)	máxima 5 minutos
1,0	165	207	28	
1,5	186	241	21	
2,0	207	241	14	
2,5	207	241	14	

Caso a pressão instalada se mantenha estável no interior do canal, é efetuado um orifício na geomembrana superior para a libertação deste. Se a libertação ocorrer sem problemas, verificando-se uma diminuição da pressão no canal de forma gradual, considera-se o ensaio conforme e a junta é considerada estanque. Caso após a injeção de ar no canal se verifique um abaixamento da pressão abaixo do valor máximo admissível, considera-se o ensaio não conforme e deverá proceder-se à reparação da junta.

A realização do ensaio de vácuo inicia-se com a lavagem da zona de soldadura com água e detergente. Posteriormente é colocada sobre a zona de soldadura uma câmara transparente, e com a ajuda de uma bomba cria-se vácuo (cerca de 20 kPa) no seu interior. O ensaio considera-se não conforme se após a aplicação da sucção se verificar a formação de “bolhas de sabão”, dando a indicação da existência de fuga. Neste caso deve proceder-se à realização da reparação da soldadura.



a)



b)

Figura 48 - Ensaio de vácuo: a) Lavagem da zona de soldadura; b) câmara de vácuo.

Para a realização do ensaio do fio de cobre, deve introduzir-se um fio de cobre na zona de sobreposição das geomembranas durante a realização da soldadura. O ensaio propriamente dito realiza-se com a aplicação de corrente elétrica através das extremidades do fio de cobre, e a verificação, com recurso à movimentação de uma sonda ao longo da soldadura dotada de um voltímetro, da ocorrência de variações de sinal. Neste caso, sendo verificada

uma variação de sinal, considera-se o ensaio não conforme e há a necessidade de se reparar a soldadura. Os resultados deste tipo de ensaio podem ser afetados por presença de humidade na superfície inferior da geomembrana.

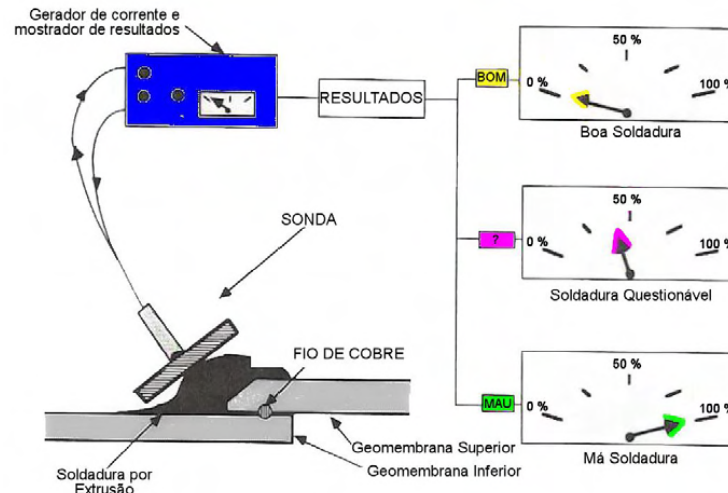


Figura 49 – Esquemática do procedimento e análise de resultados do ensaio do fio de cobre (Duarte , 2009).

Ensaio destrutivos

Os ensaios destrutivos, são realizados sobre amostras recolhidas das soldadura existentes, e têm como objetivo verificar a resistência da soldadura. Para tal, são utilizados ensaios de arranque e corte, realizados de acordo com a norma ASTM-D-6392.

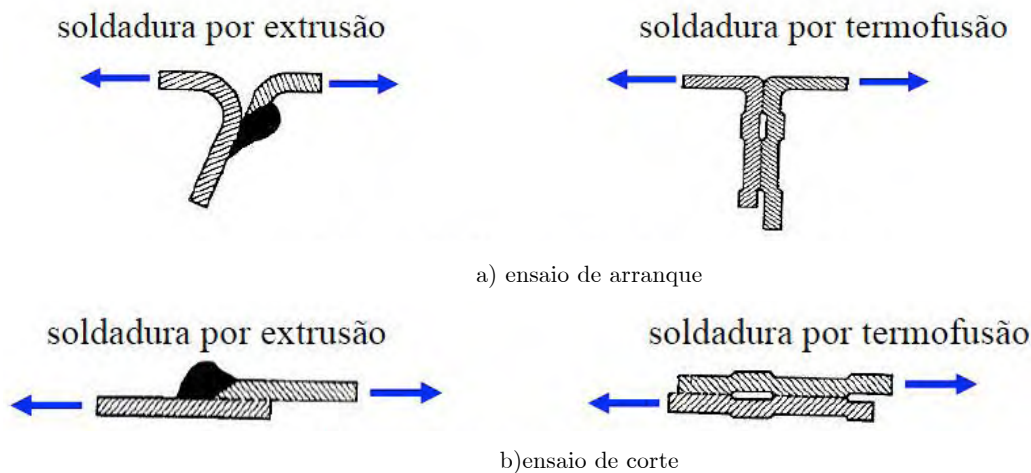


Figura 50- Esquemática do modo de aplicação da tração no a) ensaio de arranque e b) ensaio de corte (Duarte , 2009).

Os dois tipos de ensaios partilham os mesmos princípios, que consistem na aplicação de forças de tração num provete, com uma velocidade de 50 mm/minuto. A diferença entre

estes dois ensaios ocorre no afastamento inicial das garras de tração, sendo de 50mm para o ensaio de arranque, e de 25 mm para cada lado mais a largura da soldadura para o ensaio de corte. Os ensaios terminam quando se verificar a rotura do provete (arranque), ou quando se verificar uma extensão de 50% (corte). Os ensaios destrutivos realizam-se segundo a indicação da entidade fiscalizadora, que define a localização e a sua frequência de realização (normalmente entre 100 a 300m).

A escolha das amostras, para além de seguir um plano de frequência, deve também ser realizada em zonas não críticas, sendo recomendável a colheita em zonas como a vala de ancoragem, e outros locais onde seja previsível a necessidade de execução de remendos. Outro aspeto importante relativamente à recolha de amostras é a sua dimensão, a qual deverá ser de 1,5x0,3 m. Cada amostra é posteriormente dividida em três partes iguais, sendo uma para o instalador, outra para o laboratório que realizará os ensaios, e a terceira para a entidade fiscalizadora para constar em arquivo.



Figura 51 – Exemplo de recolha e divisão de amostra (Duarte , 2009).

Após a realização dos ensaios, os resultados devem ser apresentados, fazendo referência à resistência ao arranque, à separação e ao tipo de rotura, para o ensaio de arranque, e referência à resistência ao corte, à extensão e ao tipo de rotura para o ensaio de corte.

Tipo de soldadura	Tipo de rotura						
termofusão							
extrusão							
	AD	BRK	SE1	SE2	AD-BRK	SIP	
	AD1	AD2	AD-WLD1	AD-WLD2	SE1*	SE2*	
	SE3**	BRK1	BRK2	AD-BRK	HT	SIP	

* aplicável apenas no ensaio de corte

** aplicável apenas no ensaio de arranque

Figura 52 – Esquematisação dos tipos de rotura possíveis para ensaios de arranque e corte, em função do tipo de soldadura (Barroso & Lopes, 2008).

A avaliação dos resultados dos ensaios realizados, e tendo em conta os critérios de aceitação/rejeição (Figura 54), definem a conformidade ou não das soldaduras. Caso os ensaios destrutivos ditem a não conformidade da soldadura, esta deverá ser refeita entre os locais de amostra cujos resultados foram não conformes e deve refazer-se os ensaios de autocontrolo em amostras próximas (3m para cada lado da zona de amostragem), onde os resultados se mostraram não conformes, devendo a soldadura ser rejeitada no interior da zona limitada, se os resultados obtidos forem satisfatórios. Caso contrário, o processo é refeito.















Após a verificação das não-conformidades ou de locais com defeito, deve proceder-se à reparação da zona problemática através da:

- Execução de um remendo;
- Remoção da junta e substituição por uma faixa de geomembrana soldada pelo processo de termofusão;
- Execução de uma soldadura por extrusão de forma a reforçar a junta.

A execução de remendos implica que estes sejam de forma arredondada e na sua aplicação, a dimensão deva ser tal que exceda a zona afetada em 0,15m para cada lado.



Figura 53 - Exemplo de execução de remendo em geomembranas (Duarte , 2009).

Soldadura	Ensaio	Aspecto	Crítérios de aceitação/rejeição
 Termofusão	arranque	resistência ao arranque	4 provetes com resistência ao arranque ≥ 24 kN/m e 1 provete com resistência ao arranque ≥ 19 kN/m
		separação	$\leq 25\%$
		tipos de rotura inadmissíveis	  ⁽¹⁾ AD AD - BRK
	corte	resistência ao corte	4 provetes com resistência ao corte ≥ 31 kN/m e 1 provete com resistência ao corte ≥ 25 kN/m
		extensão	$\geq 50\%$
		tipos de rotura inadmissíveis	  ⁽¹⁾ AD AD - BRK
 Extrusão	arranque	resistência ao arranque	5 provetes com resistência ao arranque ≥ 20 kN/m e 1 provete com resistência ao arranque ≥ 16 kN/m
		separação	$\leq 25\%$
		tipos de rotura inadmissíveis	    ⁽²⁾ ⁽²⁾ AD1 AD2 AD-WLD1 AD-WLD2
	corte	resistência ao corte	4 provetes com resistência ao corte ≥ 31 kN/m e 1 provete com resistência ao corte ≥ 25 kN/m
		extensão	$\geq 50\%$
		tipos de rotura inadmissíveis	    ⁽²⁾ ⁽²⁾ AD1 AD2 AD-WLD1 AD-WLD2

⁽¹⁾ AD-BRK > 25% inadmissível, excepto se o valor da resistência for satisfatório.

⁽²⁾ roturas inadmissíveis, excepto se os valores da resistência forem satisfatórios.

Figura 54 - Critérios de aceitação/rejeição para soldaduras de geomembrana em aterro de resíduos (Barroso & Lopes, 2008).

- Detecção de fugas

De acordo com as especificações de projeto, prevê-se a colocação de um geotêxtil sobre a geomembrana, de forma a garantir a proteção de mesma. De fato, a proteção da geomembrana é um ponto crítico, pois mesmo protegida com o geotêxtil a aplicação do

material constituinte da camada drenante pode provocar-lhe danos. Como a danificação da geomembrana pode culminar em graves problemas ambientais, é conveniente a instalação de um sistema de detecção de fugas. Embora no caso em estudo este sistema não esteja previsto em projeto, apresentam-se de seguida o método utilizados.

Para a constituição do sistema de detecção de fugas, podem ser considerados métodos elétricos, tais como o ensaio com sistema fixo de detecção e localização de orifícios (*grid method*), o ensaio da sonda elétrica móvel (*water and soil covered geomembrane method*), e o ensaio da geomembrana condutora (*electrically geomembrane method*).

O ensaio com sistema fixo consiste na instalação sob a geomembrana de uma malha de sensores, devidamente espaçados. Posteriormente à colocação da geomembrana, é instalado um gerador que se liga a dois eléctrodos, um aplicado acima da geomembrana e outro no solo de fundação, e é aplicada uma corrente elétrica. Os sensores medem a densidade da corrente elétrica, que apresentará variações na presença de anomalias, sendo através de software apropriado localizados os orifícios na geomembrana.

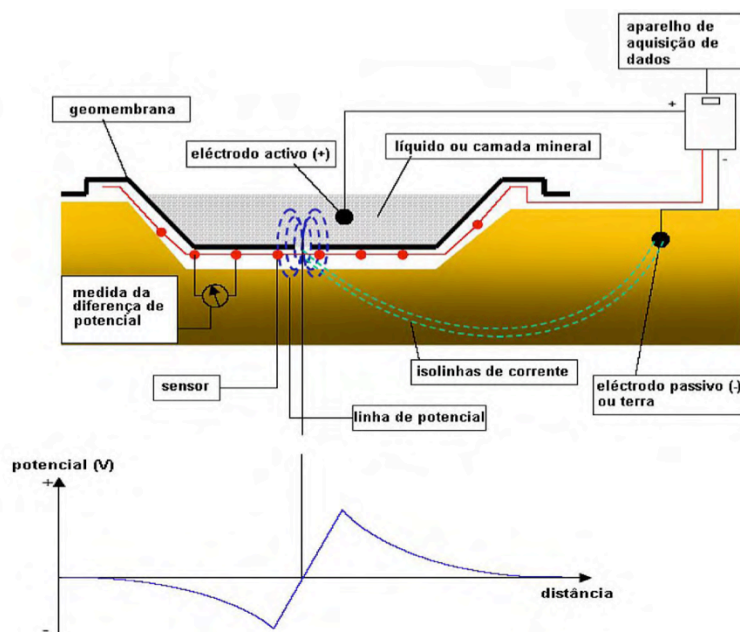


Figura 55- Esquema de método de ensaio com sistema fixo de detecção e localização de orifícios / Gráfico de diferença de potencial (Duarte , 2009).

O ensaio da sonda elétrica consiste na instalação de dois eléctrodos, um no solo e outro na camada superior à geomembrana, estabelecendo-se uma diferença de potencial entre o solo exterior e o meio interno. De seguida, é instalado um gerador de corrente contínua, e faz-se passar uma sonda elétrica móvel, que medirá o potencial elétrico de acordo com uma densidade pré-definida. A verificação de anomalias é conseguido através da verificação do

aumento de potencial, que apresentará valor máximo quando a sonda se encontrar sobre o orifício.

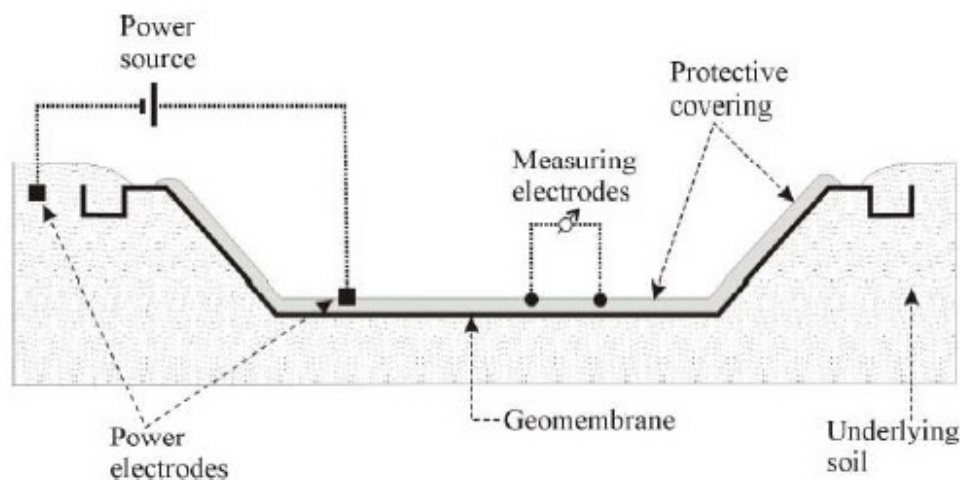


Figura 56 - Esquema de método de sonda elétrica móvel (<http://www.ids-environment.com/>).

O ensaio da geomembrana condutora exige uma geomembrana que possua uma camada inferior coextrudada condutora fina. O ensaio consiste na colocação sobre a geomembrana de uma placa condutora de neoprene com uma tensão de 15 a 30 kN. Esta carga é aplicada à geomembrana pelo efeito capacitivo, sendo de seguida feita a prospecção da superfície não condutora através de uma vassoura elétrica. A verificação dos orifícios acontece quando é estabelecida uma corrente, que dá origem a faíscas e/ou sinal sonora na superfície. Este método deve ser aplicado apenas em superfícies secas, não devendo ser utilizado em dias chuvosos.

3.4.2.2. Geocompósito bentonítico

Os geocompósitos bentoníticos, à semelhança das geomembranas, estão sujeitos a um controlo de garantia da qualidade em diversas fases. Este controlo, na fase de fabrico, fornecimento e aceitação, transporte e manuseamento é feito de forma análoga ao expostos para as geomembranas, pelo que não será enfatizado neste ponto. No entanto, é conveniente referir que os ensaios a realizar para o controlo na fase de fabrico pelo fabricante são os seguintes:

Tabela 18 – Ensaios a realizar para controlo de fabrico de geocompósito (Barroso & Lopes, 2008).

Material	Ensaios/propriedades
Bentonite	Teor em água
	Índice de expansibilidade
	Capacidade de absorção
Geotêxtil	Massa/unidade de área
	Espessura
	Resistência à tração
	Resistência ao rasgamento
	Resistência ao rebentamento
Geocompósito bentonítico	Massa/unidade de área
	Espessura
	Resistência à tração
	Resistência ao punçoamento
	Resistência ao corte
	Teor em água
	Permeabilidade

Posto isto, procede-se à explicitação do processo de controlo da qualidade a partir da fase de armazenamento.

- **Armazenamento**

A garantia da qualidade na fase de armazenamento passa por:

- Evitar o armazenamento ao ar livre, devendo ser coberto por película de polietileno de fora a evitar a sua hidratação;
- Armazenar em instalação que o protejam da chuva, humidade e raios UV, caso o armazenamento seja de longa duração;
- Controlar o empilhamento dos rolos, garantindo que este é efetuado segundo o indicado pelo fabricante;
- Garantir que a superfície sobre a qual assentam os rolos se apresenta preparada, ou seja, que não contem elementos passíveis de introduzir danos no geocompósito;

- **Instalação**

A correta instalação deste tipo de geossintético requer uma preparação previa da superfície que servirá de suporte. No caso em estudo, o geocompósito bentonítico assentará sobre a camada de solo silto-argiloso que constitui a barreira geológica natural.

Assim sendo, deverá garantir-se que a superfície de apoio:

- Se encontra nivelada, isenta de elevações e depressões;

- Se encontra isenta de fissura devido à secagem do material;
- Se encontra isenta de materiais contundentes;
- Não possui zonas moles, passíveis de incrementar deformações.

Outro aspeto importante na preparação da superfície é a garantia de uma profundidade máxima para rodeiras de 2,5 mm e dimensões máximas admissíveis para fragmentos rochosos de 12 mm.

A colocação do geocompósito deve acontecer após a execução dos trabalhos de preparação da superfície, de forma a evitar a sua danificação por ações como chuva e tráfego. Caso a aplicação do geocompósito não possa ser realizada logo após a preparação da superfície de apoio, a entidade fiscalizadora deverá realizar uma nova inspeção imediatamente antes da colocação, de forma a verificar a conformidade e a autorizar a colocação.

A preparação da vala de ancoragem assume também grande importância. No entanto, esta preparação segue os moldes da preparação já referida aquando da exposição da mesma situação para as geomembranas.

Durante o processo de colocação a entidade fiscalizadora deve verificar:

- Se a superfície de suporte não sofreu alterações desde a sua preparação;
- Se o manuseamento do geocompósito é feito de forma adequada;
- Se a limpeza da superfície superior do geocompósito foi efetuada, de forma a evitar danos nas camadas subjacentes;
- Se a colocação é realizada em condições climatéricas adequadas, sendo desaconselháveis dias chuvosos, com grande humidade ou nevoeiro;
- Se o geocompósito se encontra devidamente ancorado na vala de amarração antes de se desenrolar o rolo, evitando a formação de rugas;
- Se é utilizado equipamento adequado para a execução de cortes;
- Se o geocompósito é imediatamente coberto pela geomembrana após a colocação.

Relativamente às juntas criadas pela colocação dos painéis, foram já indicadas na exposição relativa à aplicação de geocompósito todos os requisitos necessários para a sua correta execução, sendo apenas necessário realçar, que as condições de realização das uniões devem seguir o especificado em projeto, estando a entidade fiscalizadora responsável pela verificação do cumprimento das mesmas.

A aplicação deste tipo de geossintético requer alguns cuidados, que nem sempre são cumpridos, resultando normalmente em danos, sendo necessária a reparação da zona afetada. Para tal, a zona afetada deverá ser reparada através da colocação de um remendo, que deve possuir uma dimensão que exceda no mínimo em 0,50 m a dimensão da

zona danificada, sendo este processo acompanhado e devidamente registado pela fiscalização.

3.4.2.3. Geotêxtil

Os geotêxteis, de forma análoga aos restantes geossintéticos, devem passar por um processo de controlo na fase de fabrico de forma a garantir a qualidade dos mesmos. O processo de garantia da qualidade de um geotêxtil passa também pela garantia da conformidade e características ao longo dos processo de recepção, transporte, armazenamento e aplicação.

O controlo da qualidade na fase de recepção, transporte e manuseamento deve obedecer aos pontos já mencionados para as geomembranas.

Assim sendo, na fase de armazenamento, deve garantir-se que:

- Este não é feito no exterior por mais de seis meses, caso exceda este tempo deverão providenciar-se instalações cobertas;
- A embalagem protetora é mantida sem danos, permitindo a proteção à água e raios UV;
- O geotêxtil se encontra protegido da exposição solar, temperaturas superiores a 60°C, humidade, precipitação, sujidade e danos mecânicos;
- O empilhamento não ultrapassa os cinco níveis e que não introduz danos nos rolos;
- A superfície sobre a qual serão depositados os rolos se encontra devidamente preparada.

- **Controlo na fase de instalação**

O geotêxtil funcionará como elemento protetor da geomembrana, sendo instalado sobre esta. Assim sendo, está garantida uma boa superfície de apoio para o geotêxtil. No entanto, deverá efetuar-se uma verificação da superfície de acordo com os requisitos já expostos para os restantes geossintéticos.

Na fase de aplicação do geotêxtil, a entidade fiscalizadora deverá verificar se:

- A superfície de apoio não sofreu alterações desde a aprovação, para o caso de se tratar de assentamento sobre solo;
- O método de desenrolar o geotêxtil é o indicado e não provoca danos;
- As condições de aplicação são favoráveis (ausência de vento, ou quando aplicado com vento adoptar medidas de atenuação como carregamentos provisórios);

- Se procedeu à ancoragem provisória na vala de amarração de forma a evitar a formação de dobras;
- É utilizado equipamento adequado para a realização de cortes;
- Os geotêxteis, durante a colocação, se encontram isentos de sujidade e elementos que possam por em causa a função a que se destinam;
- A camada a aplicar sobre o geotêxtil é executada dentro do limite de tempo definido pelo fabricante na declaração de durabilidade, de forma a que este não perca as suas características, por exposição prolongada a agentes agressores.

A entidade fiscalizadora deve registar o número de ordem de aplicação de cada painel, a data de colocação e a identificação do rolo aplicado.

Relativamente à união entre painéis, esta deverá ser realizada de acordo com as condições especificadas quando expostos os métodos disponíveis para a sua realização, e respeitar as especificações definidas em projeto, estando sempre sujeitas à averiguação por parte da fiscalização.

Caso, durante o transporte, o manuseamento e a aplicação sejam imputados danos ao geotêxtil, este deve ser reparado. Para a reparação deverá aplicar-se um remendo, constituído por material idêntico, e com área tal que exceda em 0,30 m para cada lado a zona danificada, devendo ser colocado segundo a direção de fabrico do painel. Todas as reparações realizadas devem ser registadas pela entidade fiscalizadora.

4. Caso de estudo: o aterro da Suldoouro

4.1. Empresa responsável pela construção

A dst – Domingos da Silva Teixeira, S.A. é uma empresa de construção civil e obras públicas, sediada em Palmeira, Braga, tendo sido constituída em 1984, designada, então, por dst – Domingos da Silva Teixeira & Filhos, Lda. Em 1996, a empresa passa a sociedade anónima. Desde 1999 que se encontra inserida no dst group, liderado pela empresa-mãe DST SGPS, S.A. O grupo é atualmente constituído por 61 empresas, tendo apresentado em 2012 um faturação de 198,6 milhões de euros. No mesmo ano o grupo possuía um total de 1523 colaboradores, sendo 494 desses colaboradores da Domingos da Silva Teixeira, S.A. O grupo está presente em diversos mercados, nomeadamente Espanha, França, Moçambique e Angola, operando em áreas como engenharia e construção, energias renováveis, telecomunicações e ambiente e águas. Encontra-se certificado pela APCER na área da qualidade e de acordo com a Norma NP EN ISO 9001:2008 em diversas áreas, destacando-se a construção civil e obras públicas e ensaios laboratoriais.



Figura 57 – Logótipo da empresa

As instalações do grupo proporcionam aos seus colaboradores uma série de atividades, nomeadamente culturais e desportivas, de forma a promover o bem estar dos mesmos, estando em 2012 referenciado no estudo “Melhores Empresas para Trabalhar”, levado a cabo pela revista Exame em parceria com a Accenture.

4.2. Geologia e geotecnia

Para a conceção do novo aterro sanitário da Suldoouro, foi necessária a realização de um reconhecimento geológico-geotécnico do local de implementação do mesmo. Tal estudo foi desenvolvido pela GEOCONTROLE - Geotecnia e Estruturas de Fundação S.A. . A campanha de prospecção geotécnica envolveu uma série de trabalhos de campo, nomeadamente sondagens mecânicas, instalação de piezómetros, ensaios de permeabilidade, poços de reconhecimento e perfis sísmicos de refração.

As sondagens geotécnicas foram realizadas recorrendo a carotadores com 86mm de diâmetro, devidamente equipados em função das características petrográficas e estado de alteração e fraturação dos maciços rochosos. Em maciços terrosos recorreu-se a ensaios

Standard Penetration Test (SPT), de penetração dinâmica espaçados de 1,5m, em conformidade com a norma EN ISO 22476-3:2005.

A caracterização dos maciços rochosos efetuou-se recorrendo a parâmetros como Rock Quality Designation (RQD), estado de fraturação (F) e estado de alteração (W). Em maciços terrosos, a caracterização de areias e argilas realizou-se a custa de compactidade e consistência, respetivamente.

A avaliação das condições hidrogeológicas do local foi conseguida através da colocação, em dois dos furos de sondagem, piezómetros hidráulicos de circuito aberto.

De forma a avaliar as características de permeabilidade do maciço terroso superficial, foram executados ensaios de permeabilidade Lefranc de carga variável. Este tipo de ensaio consiste na adição de um determinado volume de água no furo de sondagem, e a verificação da sua taxa de absorção, permitindo a determinação do coeficiente de permeabilidade (K), expresso em cm/s. Destes ensaios registaram-se valores de K entre 1.2×10^{-3} e 8.9×10^{-4} cm/s, tendo sido estes realizados até uma profundidade de 5,5m.

Para a avaliação do maciço rochoso, nomeadamente o estado de fraturação e a regime hidrogeológico, recorreu-se durante a furação, a ensaios de injeção de água do tipo Lugeon. Estes ensaios consistem na injeção de água sob pressão num troço de furo e a medição da absorção de água que se infiltra pelas fraturas. É feito em patamares de 10 minutos onde se vai aumentando a pressão até um máximo de 10 Kgf/cm².

A prospecção geofísica baseou-se no método sísmico de refração, visando o zonamento dos terrenos em termos de velocidade de propagação das ondas sísmicas longitudinais. Para tal, efetuaram-se 6 perfis de refração com 65 m de comprimento de base sísmica de forma a verificar as condições de escavabilidade/ripabilidade dos maciços.

Os poços de reconhecimento, permitiram uma caracterização litológica e estratigráfica dos diversos horizontes atravessados, através de uma análise macroscópica, e a recolha de material para processamento laboratorial.

O material recolhido foi submetido a tratamento laboratorial recorrendo aos seguintes ensaios:

- Análise granulométrica por peneiração (LNEC E239)
- Determinação dos limites de consistência de Atterberg (LL e LP) (NP 143)
- Ensaio de compactação, proctor modificado (LNEC E197)
- Ensaio de permeabilidade em permeâmetro (BS 1377-1990)

Para além dos ensaios realizados às amostras de solo recolhidas, foram também realizados ensaios químicos às águas, de modo a caracterizar a sua agressividade e determinar a classe de exposição ambiental do betão que estará em contato com estas (LNEC E378 - 1996).

Foram então determinados parâmetros como o pH, a alcalinidade antes e após contato com CaCO_3 , e avaliados os teores de iões agressivos como SO_4^{2-} , NH_4^+ , Mg^{2+} .

4.3. Geomorfologia

A zona de implementação do aterro é caracterizada por relevos acidentados, resultantes da erosão diferencial dos maciços de rochas quartzíticas do Ordovício, orientadas preferencialmente segundo NW-SE. O local de implementação interseta feições morfológicas irregulares, o que dá origem a consideráveis variações altimétricas, e está inserido numa vasta rede hidrográfica, de configuração dendrítica e com características sazonais.

A região é maioritariamente constituída por rochas metamórficas, compostas por xistos, grauvaques, e quartzitos do Ordovício. O maciço encontra-se dobrado em anticlinal, encontrando-se a dobra bastante erodida e falhada ao longo do seu eixo. As descontinuidades presentes no maciço agravam o comportamento geomecânico do mesmo, bem como o seu comportamento hidrológico, introduzindo zonas de percolação.

Relativamente a sismicidade, a região de implementação do aterro insere-se numa zona de baixa sismicidade.

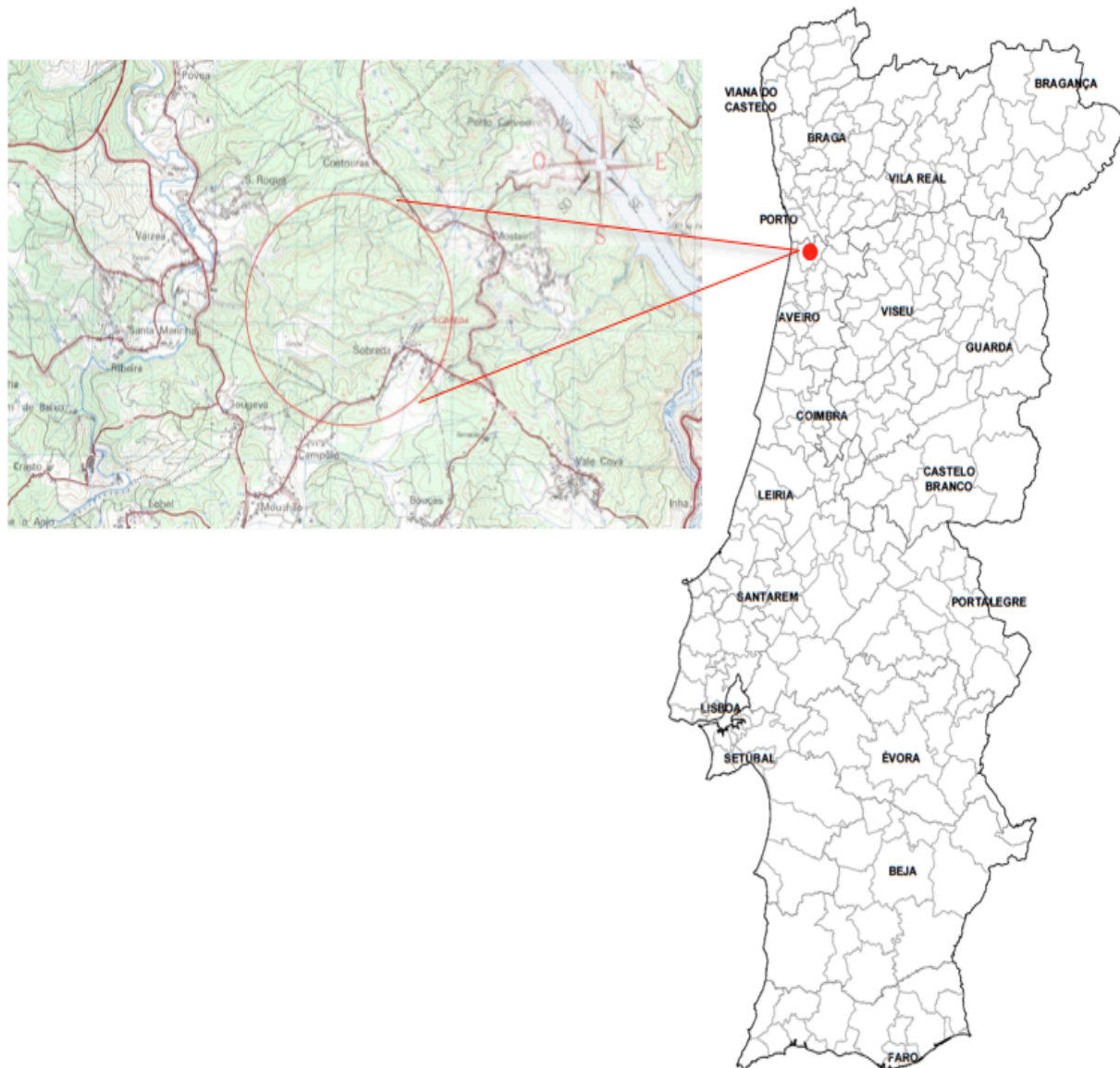


Figura 58 - Localização do novo aterro da Suldoouro

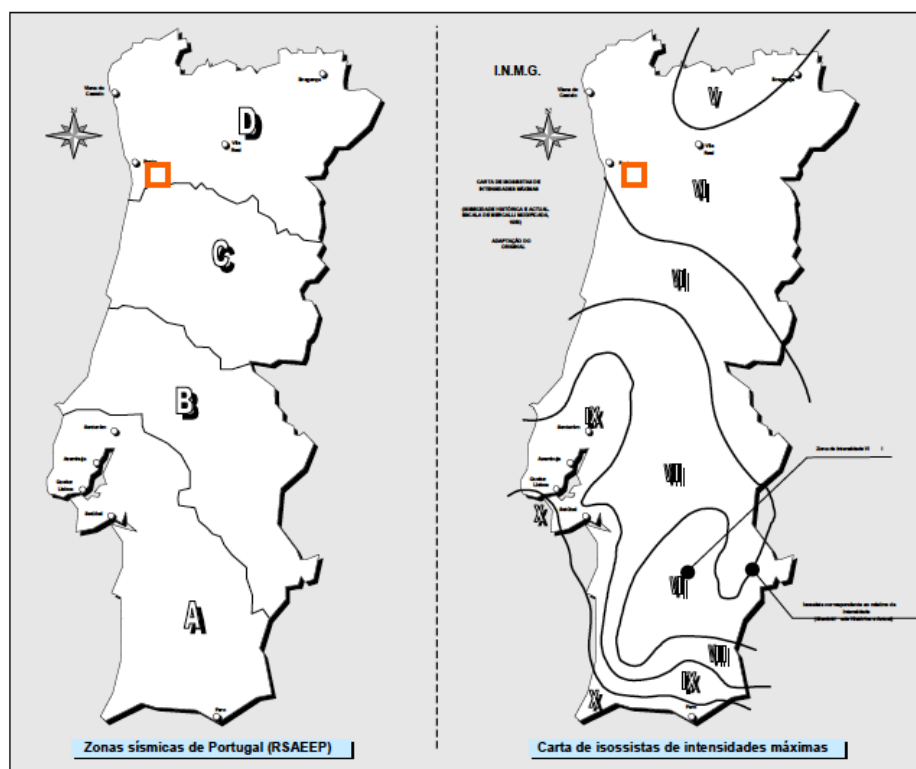


Figura 59- Mapa de zonamento sísmico de Portugal Continental com a referência da localização da infraestrutura

4.4. Hidrogeologia

A região de implementação do aterro insere-se na bacia hidrográfica do rio Douro, drenando diretamente para um dos seus afluentes, o rio Uima. O escoamento considera-se relativamente substancial, encontrando-se condicionado pela espessura da camada alterada do maciço e pelas fraturas existentes no mesmo. Devido à constituição do maciço, os níveis freáticos desenvolvem-se em função da sua topografia, sendo estes muito sensíveis às variações de precipitação.

Os aquíferos podem ser de permeabilidade ou de porosidade, dependendo do grau de alteração do maciço. Na área superficial do maciço, caracterizada por grandes alterações, a infiltração é feita essencialmente por porosidade. Nos ensaios realizados, foram obtidos valores para o coeficiente de permeabilidade, K , para este material na ordem de 10^{-4} a 10^{-5} cm/s.

Em zonas mais profundas do maciço, a infiltração faz-se através das discontinuidades do próprio maciço, tendo sido verificados valores para a permeabilidade média na ordem dos 10^{-5} cm/s.

Os ensaios de permeabilidade realizados, recorrendo a amostras remexidas e com diferentes teores em água, revelaram valores de K na ordem de $1,4 \times 10^{-5}$ cm/s a $5,5 \times 10^{-5}$ cm/s. Posto isto foram então estabelecidos coeficientes de permeabilidade para os xistos muito

alterados (W5), na ordem de $1,4 \times 10^{-5} \leq K \leq 1,2 \times 10^{-3}$ cm/s, e de $7 \times 10^{-6} \leq K \leq 1 \times 10^{-5}$ cm/s no caso dos xistos rochosos mediantemente fraturados. Assim sendo, para o caso do maciço rochoso pode classificar-se este como muito impermeável a praticamente impermeável, já a classificação do maciço terroso pode definir-se com grau de permeabilidade média a baixa.

Com os ensaios realizados em laboratório, e segundo a classificação unificada ASTM, as amostras tratadas foram classificação nos subgrupos GP-GM, GM, GW-GM E SW, no caso da classificação ASSHTO, estes classificam-se nos grupos A-1-a, A-1-b e A-2-4.

Os ensaios de permeabilidade executados em laboratório, sobre provetes compactados a cerca de 95% e perto do teor em água ótimo apresentam coeficientes de permeabilidade na ordem de $1,4 \times 10^{-5} \leq K \leq 5,5 \times 10^{-5}$ cm/s. Com estes valores verifica-se a impossibilidade da utilização deste tipo de material na barreira de proteção do aterro. Assim sendo, e de forma a proceder à reutilização de solos e a cumprir as requisitos estabelecidos na legislação, procedeu-se à britagem do material rochoso extraído da escavação da célula. A britagem deste material surge como solução para o aumento da percentagem de finos e consequentemente para o aumento do coeficiente de permeabilidade para valores admissíveis.

A avaliação do desempenho geotécnico permite concluir também sobre a compatibilidade de execução de fundações diretas, sendo mobilizada uma tensão de contato de cerca de 500 kPa.

4.5. Impermeabilização

Na impermeabilização do novo aterro de resíduos da Suldouro são aplicadas quatro soluções.

4.5.1. Célula de confinamento

Para a impermeabilização da célula de confinamento foram consideradas duas soluções: uma para a zona basal e outra para os taludes.

a) Zona basal

A solução de impermeabilização para a zona basal da célula foi dimensionada tendo em conta a pressão máxima exercida pelos resíduos, tendo sido implementada a solução exposta na Figura 60. Esta pressão, à data do fecho da célula, representa o efeito promovido por pela altura de 43,65 m de resíduos, pela camada drenante, e pela cobertura final, sendo calculada por:

$$P = (H \times P_{ru}) + (d_i \times P_i) + (h \times P_f)$$

Onde:

P_{ru} – Peso específico dos resíduos (10 KN/m³);

- Pi – Peso específico dos materiais que constituem a camada drenante (20 KN/m^3);
 Pf – Peso específico dos materiais que constituem a cobertura final (21 KN/m^3);
 di – Espessura dos diferentes materiais da camada drenante (0,50 m);
 H – Altura mais desfavorável da massa de resíduos (m);
 h – Altura da cobertura final (2,0 m).

A pressão máxima que é exercida pelos resíduos, com recurso à formula anteriormente exposta assume o valor de $488,50 \text{ kN/m}^2$.

De forma a respeitar o descrito na legislação, a solução de impermeabilização da zona basal é constituída por duas estruturas: as barreiras passiva e ativa.

A barreira passiva é constituída por uma camada de solo silto-argiloso com espessura de 0,50m reforçada superiormente por um geocompósito bentonítico com coeficiente de permeabilidade $k \leq 2,0 \times 10^{-11} \text{ m/s}$.

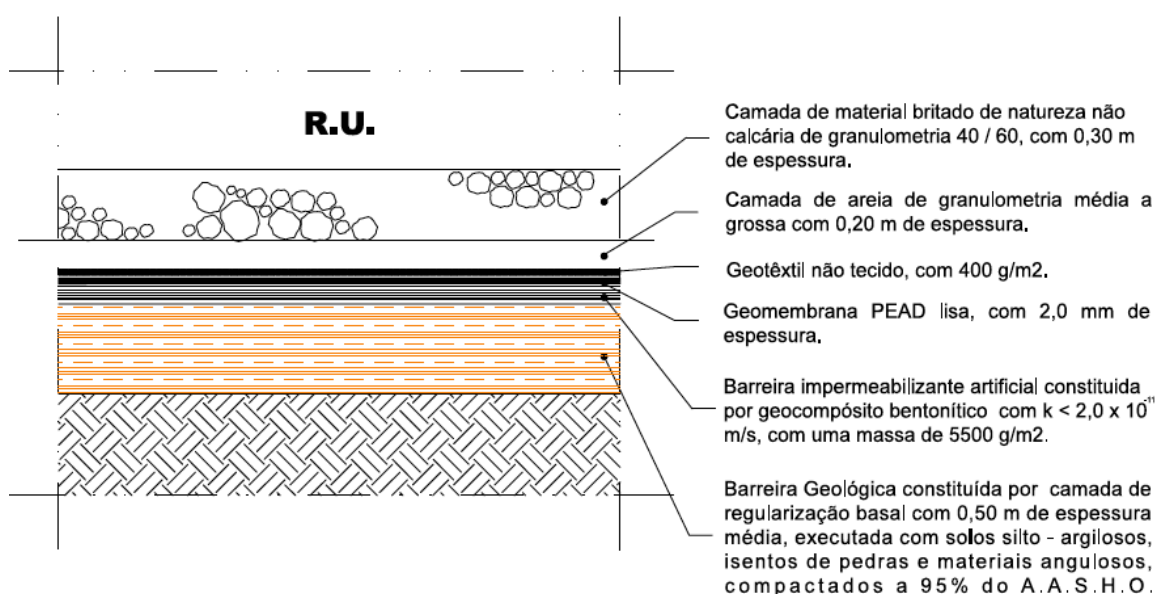


Figura 60 – Pormenor do sistema de impermeabilização da zona basal

- **Barreira Geológica**

A camada de solo silto-argiloso é constituída por material proveniente da escavação da célula que, de forma a promover uma melhoria das suas características, como já referido, sofreu um processo de britagem. O material britado foi submetido a ensaios de caracterização, tendo-se concluído que se trata de um solo SM (areia siltosa), de acordo com a classificação unificada de solos (ASTM D2487) ou um solo A-4 (1) de acordo com a classificação para fins rodoviários (LNEC E-240). Em anexo (anexo B) apresentam-se os ensaios realizados ao material, bem como os respetivos resultados obtidos.

Um solo deste tipo possui algumas propriedades como baixa permeabilidade e compressibilidade quando compactado, boa resistência ao corte e razoável trabalhabilidade.

A trabalhabilidade do material está diretamente relacionada com o índice de plasticidade, sendo que quanto menor for o valor deste melhor será esta característica. Neste caso, o índice de plasticidade do material é de 5%, valor que se encontra abaixo do mínimo recomendado 10%. Este valor baixo permite, como já referido, uma melhor trabalhabilidade do material, e demonstra que estamos na presença de um material pouco plástico, com pouca tendência para tornar-se pegajoso quando húmido, e com pouca probabilidade de ocorrência de formação de torrões quando seco. Outro aspeto importante neste material é a sua granulometria. Para a constituição da barreira geológica natural, este deverá possuir uma percentagem de finos não inferior a 30%, de forma a garantir o coeficiente de permeabilidade desejado. Neste caso, o material apresenta uma percentagem de passados no peneiro #200 de 41%, garantindo assim o coeficiente de permeabilidade recomendado. De forma a que sejam evitadas, aquando da sua aplicação, a formação de bolsas, que permitirão o aumento da condutividade hidráulica, a percentagem de material grosso (retidos no peneiro n°4 ASTM) deve ser limitada a um máximo de 30%. Como se pode verificar pelos resultados dos ensaios realizados, apresentados em anexo, este parâmetro é cumprido, pois o solo apresenta uma percentagem de retidos no peneiro n°4 de 14,5%.

Este solo, para poder fazer parte da barreira geológica natural, tem de ser isento de pedras e materiais angulosos e aplicado em camadas com espessura inferior a 0,20m perfazendo no final uma camada com espessura de 0,50m. A garantia das propriedades referentes à permeabilidade e compressibilidade típicas deste material são conseguidas com recurso a uma compactação do solo, devendo o grau de compactação ser de 95% como definido nas normas estabelecidas pela AASHTO (LNEC E-242). É comum em projeto ser referido o grau de compactação que deve ser atingido na construção das camadas, no entanto é aconselhável a definição do teor em água de compactação e o peso volúmico seco a atingir na compactação.

- **Geocompósito bentonítico**

O geocompósito bentonítico, como já explicitado, é constituído por um núcleo de bentonite envolto em geotêxtil.

A bentonite utilizada no geocompósito a instalar na barreira ativa do sistema de impermeabilização, trata-se de uma bentonite sódica natural. Este tipo de bentonite apresenta melhores características de impermeabilização, devido à sua estrutura, que se

apresenta bastante coesa e orientada, possuindo um grande número de pequenos poros. A bentonite sódica natural apresenta também menor degradação das propriedades de hidratação, sendo que mesmo sujeita a pressões mecânicas e climatéricas (ciclos de molhagem/secagem) mantém quase na sua totalidade as capacidades iniciais de retenção de água (Oliveira, 2001). A Tabela 19 apresenta algumas das características que esta bentonite sódica natural utilizada apresenta.

Tabela 19- Propriedades da bentonite utilizada no núcleo do geocompósito bentonítico

Material	Unidade	Norma	Valor
Bentonite sódica natural	%	-	100
Montmorilonite	%	xrd	90
Absorção de água	%	ASTM E 946	600
Humidade	%	DIN 18121 / ISO 11465	<15

Como se verifica através da tabela apresentada, este tipo de bentonite apresenta uma elevada percentagem de montmorilonite. A montmorilonite possui um elevado valor de superfície específica ($800 \text{ m}^2/\text{g}$) que, aliado a um arranjo molecular, permite um grande número de cargas elétricas nas faces das suas partículas, o que faz com que estas sejam os minerais de argila mais ativos e possuam uma grande capacidade de absorção de água e sais (Oliveira, 2001).

O núcleo de bentonite é envolto em geotêxtil, tratando-se, neste caso, de um geotêxtil não tecido agulhado com uma massa de $220 \text{ g}/\text{m}^2$ como mencionado na Tabela 20.

O tipo de geotêxtil a utilizar no geocompósito bentonítico varia em função das propriedades do local de implementação do mesmo, podendo ser aplicado geotêxtil tecido ou não tecido. No caso em estudo, optou-se pela utilização de um geotêxtil não tecido devido às suas propriedades físicas mecânicas e hidráulicas.

A massa por unidade de área, ou gramagem, propriedade importante na escolha do geotêxtil, para além de influenciar o custo do geossintético, está também diretamente relacionada com outras propriedades tais como a resistência à tração e a resistência ao punçoamento. No caso do geotêxtil em PP, não tecido agulhado, com uma massa de $220 \text{ g}/\text{m}^2$, pode definir-se, de acordo com Lopes & Lopes (2010), uma resistência a tração de sensivelmente $10 \text{ kN}/\text{m}$.

Tabela 20 – Características do geotêxtil a utilizar no geocompósito bentonítico

Propriedades do geotêxteis			
Material	Unidade	Norma	Valor
Polipropileno, não tecido, agulhado	-	-	-
Massa por unidade de área	g/m^2	EN ISO 9864	220

A junção dos geotêxteis com o núcleo de bentonite é realizada recorrendo a um processo de agulhagem, dando origem ao geocompósito bentonítico. A escolha de geossintéticos destes género requer o conhecimentos de alguns parâmetros, tais como a massa por unidade de área, o coeficiente de permeabilidade, a resistência a ação de cargas e a espessura. A massa por unidade de área e o coeficiente de permeabilidade estão diretamente relacionadas com o tipo e estado físico da bentonite constituinte do núcleo. No caso em estudo, a bentonite constituinte do geocompósito bentonítico encontra-se em pó. A utilização de bentonite em pó em detrimento da bentonite em grão apresenta, de fato, vantagens, pois esta, por ser em pó, apresenta menos poros, o que minimiza a passagem do fluido antes da hidratação e da constituição da barreira, e apresenta valores menores para a dilatação aquando da sua hidratação. A Tabela 21 apresenta as principais propriedades do geocompósito bentonítico a instalar no sistema de impermeabilização do aterro em estudo.

Tabela 21 - Propriedades do geocompósito a aplicar

Propriedades do geocompósito			
Propriedades	Unidade	Norma	Valor
Massa de bentonite	g/m ²	UNE EN 14196	5500
Coefficiente de permeabilidade	m/s	DIN 18130 /ASTM D 5887	$\leq 2,0 \times 10^{-6}$
Resistência à tração ambas as direções	kN/m	UNE EN ISO 10319 ASTM D 4595	12
Espessura	mm	UNE EN 964 - 1	6

- **Geomembrana**

- Dimensionamento

A barreira ativa do sistema de impermeabilização do caso em estudo é constituída por uma geomembrana de PEAD, um geotêxtil de proteção, e pelo sistema de drenagem de lixiviados.

A geomembrana em PEAD é utilizada no sistema de impermeabilização como uma barreira ativa aos fluidos, de forma a evitar a percolação de lixiviados para o meio envolvente do aterro. Para a escolha da geomembrana a utilizar é necessário o conhecimento de algumas das suas propriedades, como a espessura, e a sua resistência à tração, ao rasgamento e ao punçoamento.

A espessura da geomembrana influencia diretamente todas as outras características. Assim sendo, torna-se fundamental que se proceda a um correto dimensionamento desta, de forma a que se garantam as propriedades necessárias a cada caso. No caso em estudo o dimensionamento da geomembrana foi efetuado com recurso a:

$$\sigma_{adm} \times e_{req} \times \cos \beta = P \times b \times [\operatorname{tg}(\delta_s) + \operatorname{tg}(\delta_i)]$$

Onde :

σ_{adm} - tensão admissível (30.000 kN/m²);

e_{req} - espessura da geomembrana (m);

P – Pressão exercida (488,50 kN/ m²);

b – Tolerância admitida (5%);

δ_s – Ângulo de atrito entre a geomembrana e o material superior (10°);

δ_i - Ângulo de atrito entre a geomembrana e o material inferior (10°);

β – Ângulo da força mobilizadora da geomembrana com a horizontal (30°).

Com a utilização da fórmula acima mencionada, e aplicando um fator de segurança⁷ (com um valor de 4), obtém-se a espessura recomendada. Como neste caso o valor de cálculo é inferior à espessura recomendada para a utilização deste tipo de geossintético em aterros, utiliza-se o valor mínimo recomendado de 2mm.

Na Tabela 22 são enunciadas algumas das características que a geomembrana escolhida para aplicação deve possuir.

Tabela 22 – Características da geomembrana a aplicar

Material	Geomembrana PEAD		
Propriedade	Unidade	Norma	Valor
Espessura	mm	ASTM D 5199	2
Superfície	-	-	Lisa
Densidade	g/cm ³	ASTM D 792	≥ 0,94
Resistência ao rasgamento	N	ASTM D 1004	≥ 275
Resistencia ao punçoamento	N	ASTM S 4833	≥ 690
Resistência à tração (ambas as direções)	N/mm	ASTM D 638 type IV/D 6693	31
Conteúdo em negro de carbono	%	ASTM D 1603	2,0 – 3,0
Tempo de indução da oxidação (OIT)	min	ASTM D 3895	≥ 100
Dispersão de negro de carbono	-	ASTM D 5596	1 / 2

- **Geotêxtil**

- Dimensionamento

Sobre a geomembrana é aplicado um geotêxtil não tecido, de forma a protegê-la das solicitações mecânicas. O geotêxtil a aplicar deverá ser corretamente dimensionado de forma a cumprir a função a que se destina. Normalmente, este processo de

⁷ O valor do fator de segurança pode assumir valores inferiores, como 2 (Koerner, 2005), no entanto, tendo em conta o risco e a variabilidade da ocorrência de tensões optou-se pela utilização de um valor superior.

dimensionamento recai sobre a verificação da resistência ao punçoamento e ao rasgamento do geotêxtil.

A verificação da resistência ao rasgamento foi efetuada com recurso à formula:

$$F = \pi \times d_a^2 \times P \times S'$$

Onde:

d_a – Diâmetro médio do material da camada drenante (**40 mm**);

S' – Fator de forma ($S' = (1 - S)$, sendo S a esfericidade, para o caso admitiu-se **$S = 0,5$**);

P – Pressão exercida (KN / m²)

Para a verificação da resistência ao punçoamento foram utilizadas as seguintes formulas:

$$F_{cbr} = (F_p \times d_p) / (d_a \times S)$$

$$F_p = [(\pi \times d_a^2) / 4] \times P$$

Onde:

d_p – Diâmetro do pilão de ensaio (0,05 m);

d_a – Diâmetro médio do material da camada drenante (40 mm);

S – Esfericidade do material ($S = 0,5$);

P – Pressão exercida (KN / m²).

De forma a que se garanta a resistência do geotêxtil não tecido para as solicitações quer de rasgamento quer de punçoamento, os valores obtidos pelas formulas apresentadas, são afetados por coeficientes de segurança com valores de 4 e 2, respetivamente.

A verificação da resistência do geotêxtil não tecido as solicitações indicadas, é feita para a situação mais desfavorável, ou seja, quando este se encontra em contato direto com a camada drenante, constituída por seixo rolado. De fato esta situação não é verificada, pois entre o geotêxtil e a camada drenante é aplicada uma camada de areia de granulometria média a grossa, que protege o geotêxtil da ações diretas da camada drenante. A Tabela 23 apresenta as propriedades do geotêxtil não tecido a utilizar na proteção da geomembrana.

Tabela 23 - Propriedades do geotêxtil de proteção a aplicar

Propriedades	Unidade	Norma	Valor
100% polipropileno	%	-	100
Espessura @2kPa	mm	EN ISO 9863	2,6
Massa por unidade de area	g/m ²	EN ISO 9864	400
Resistência à tração (ambas as direções)	KN/m	EN ISO 10319	4,9
Punçoamento estático (CBR)	KN	EN ISO 12236	3,1
Porometria O90	µm	EN ISO 12956	65
Permeabilidade (ViH50)	L/s.m ²	EN ISO 11058	30

No caso em estudo, o projeto não é claro sobre o tipo de ligação a utilizar entre painéis de geotêxtil, assim sendo será feita um breve análise, de forma a sugerir a solução mais indicada para o caso.

A união por sobreposição é desaconselhável, pois sobre o geotêxtil será aplicada uma camada de areia. A aplicação da camada de areia sobrejacente poderá levar à migração de partículas da mesma entre a interface de contato dos geotêxteis na faixa de sobreposição. Outro fato a ser considerado neste tipo de união, é a quantidade considerável de material desperdiçado, comparativamente aos restantes métodos.

Uma união por soldadura, como já referido, requer a presença de uma superfície seca e limpa, o que “*in situ*” pode ser difícil de garantir. Mesmo que estas condições sejam garantidas aquando da colocação do geotêxtil, e durante o processo de soldadura, com a movimentação do material inerente ao processo estas podem ser comprometidas, pondo em causa a qualidade da soldadura, sendo desta forma também desaconselhável a execução deste tipo de ligação.

Posto isto, aconselha-se o recurso a ligações por costura por fio, pois embora estas permitam a obtenção de uma tensão na costura inferior à soldadura, são de mais fácil execução, e os custos inerentes a esta solução são inferiores. As únicas precauções associadas a este tipo de ligação, são a escolha do fio e a garantia da distância adequada entre a soldadura e o bordo do painel.

b) Septos de divisão de alvéolos

A célula de confinamento do novo aterro de resíduos da Suldouro é dividida em 5 alvéolos. A divisão é conseguida com recursos a septos que definem os limites de alvéolos adjacentes. Estes septos não são mais do que faixas onde a cota do fundo da célula se encontra mais elevada, sendo estas faixas delimitadas por taludes com uma configuração de 1,5/1 como ilustrado na Figura 61. Estes septos criam uma particularidade no sistema de impermeabilização da zona basal.

Nestas faixas, existe um reforço da geomembrana com a colocação de uma geomembrana transversalmente à geomembrana do sistema de impermeabilização. Esta geomembrana de reforço deve prolongar-se 1,5 m para além da base do talude do septo, sendo amarrada nas extremidades pela ação do peso da camada drenante. O geotêxtil de proteção da geomembrana deverá prologar-se ao longo do talude do septo até ao encontro deste com a superfície superior da camada drenante. A Figura 61 representa o pormenor do sistema de impermeabilização nas zonas dos referidos septos.

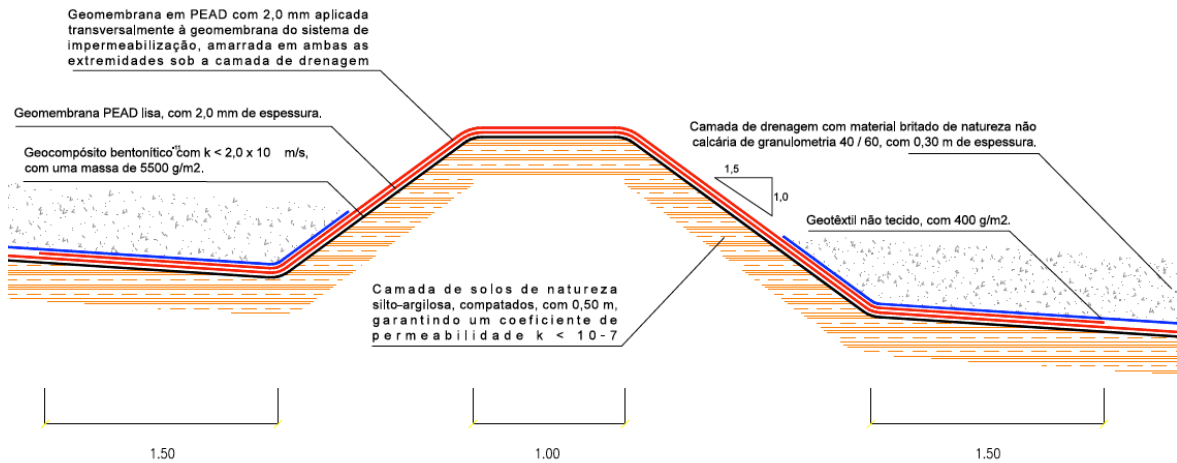


Figura 61 – Pormenor dos septos de divisão de alvéolos

c) Taludes

A impermeabilização da célula de confinamento, contempla, ainda, um sistema impermeabilização nos taludes da mesma, ligeiramente diferente do implementado na zona basal.

Tal como a zona basal, na zona dos taludes e banquetas, o sistema de impermeabilização contempla uma barreira ativa e uma barreira passiva. A barreira passiva é composta por uma barreira geológica constituída por uma camada de solo silto-argiloso com uma espessura de 0,50 metros. Esta barreira passiva é ainda complementada por um geocompósito bentonítico com propriedades semelhantes ao utilizado na barreira da zona basal.

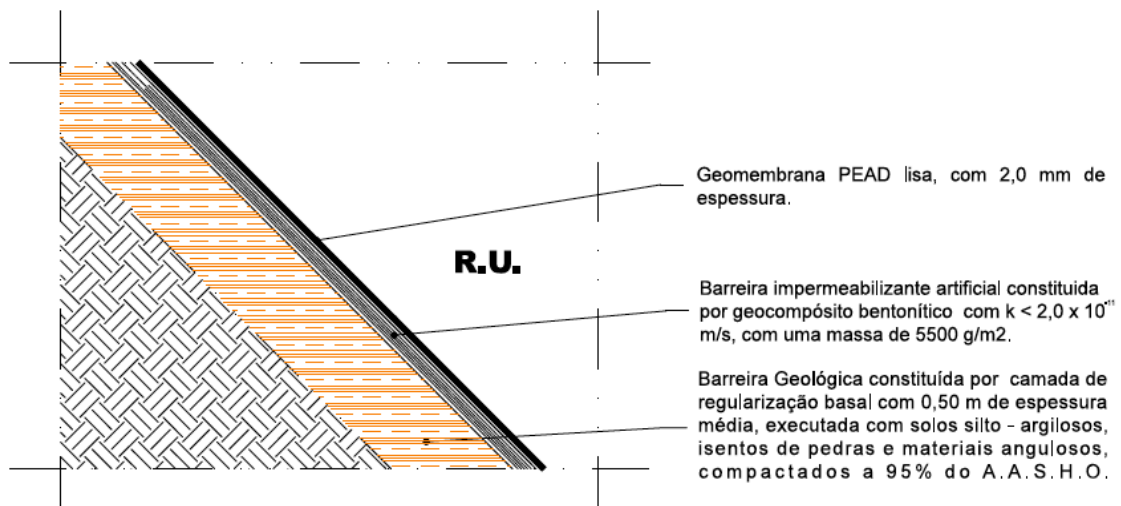


Figura 62- Pormenor do sistema de impermeabilização implementados nos taludes da célula de confinamento

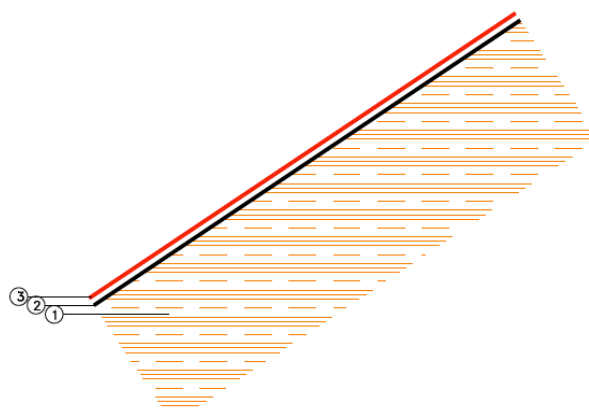
No caso das banquetas e taludes, a barreira ativa é composta apenas pela geomembrana lisa de PEAD com 2,0 mm de espessura.

Como os materiais a utilizar nos taludes são semelhantes aos que serão utilizados na zona basal, as especificações técnicas destes podem ser encontradas no ponto referente à impermeabilização da zona basal.

4.5.2. Lagoas de efluente bruto, efluente tratado e tempestade

A estação de tratamento de lixiviados do novo aterro de resíduos da Suldouro possui três lagoas, designadas por lagoas de efluente bruto, efluente tratado e tempestade.

A lagoa de efluente bruto destina-se a receber os lixiviados provenientes da célula de confinamento, enquanto que a lagoa de efluente tratado recebe e armazena o lixiviado proveniente do processo de tratamento até que este seja enviado para rede pública, onde terá o tratamento final. Dada a perigosidade de contaminação da envolvente destas duas lagoas, o sistema de impermeabilização concebido para elas é semelhante ao dimensionado para a célula. Na Figura 63 apresenta-se o pormenor do sistema de impermeabilização das lagoas de efluente bruto e tratado.



1 - Camada de solos de natureza silto-argilosa, compactados, com 0,50 m, garantindo um coeficiente de permeabilidade de $k < 10^{-7}$.

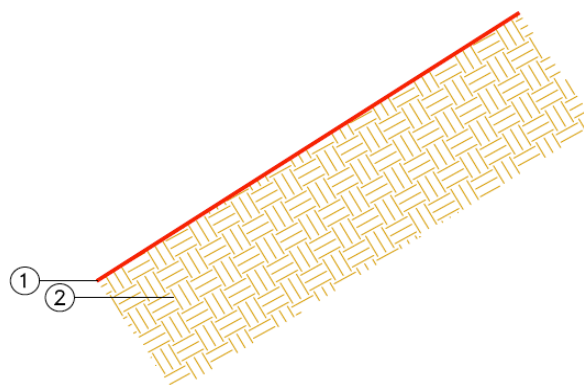
2 - Geocompósito bentonítico com $k < 2,0 \times 10^{-11}$ m/s, com uma massa de 5500 g/m²

3 - Geomembrana PEAD lisa, com 2,0 mm de espessura.

Figura 63 - Pormenor do sistema de impermeabilização das lagoas de efluente bruto e tratado.

A lagoa de tempestade que visa a regularização de caudais resultantes das águas precipitadas e águas subterrâneas, nomeadamente provenientes do sistema de drenagem sub-superficial da célula de confinamento, apresenta um sistema de impermeabilização diferente. Dada a baixa perigosidade da massa líquida que esta albergará, a impermeabilização é feita recorrendo apenas à aplicação de uma geomembrana com as

mesmas características da especifica anteriormente para a zona basal da célula de confinamento.



1 - Geomembrana PEAD lisa, com 2,0 mm de espessura.

2 - Terreno natural compactado.

Figura 64-Pormenor da impermeabilização da lagoa de tempestade

4.5.3. Amarração de geossintéticos

Os geossintéticos aplicados no sistema de impermeabilização de um aterro de resíduos, devem ser corretamente ancorados, de forma a evitar a movimentação destes, o que pode colocar em risco o correto funcionamento do sistema. Para tal, é criada uma zona de amarração. Esta amarração é conseguida com a mobilização de forças tangenciais de atrito, no contato dos geossintéticos com o terreno nessa zona. Dada a configuração da vala de amarração e a extensão do geossintéticos dentro desta, a mobilização de forças de tangenciais de atrito é feita segundo a horizontal e a vertical. Na zona onde os geossintéticos se encontram na horizontal, a tensão normal resulta do peso do solo colocado sobre este. Na zona onde estes se encontram na vertical, as tensões são mobilizadas a custa do impulso passivo de repouso do solo (Carreira & Cabeças, 2002).

- Dimensionamento

A tensão de tração mobilizada na vala de amarração depende de algumas condições, tais como:

- Profundidade e largura da vala;
- Características mecânicas do material de enchimento da vala;
- Ângulos de atrito nas interfaces do geossintético-solo.

Para o dimensionamento da vala é necessário o conhecimento da força máxima a transmitir ao solo. Considera-se que esta força corresponde à máxima força de tração que é

admissível na geomembrana. Assim sendo, no caso em estudo, optou-se por se arbitrar valores para a profundidade da vala e altura da camada de solo sobre a vala, determinando-se apenas a largura da mesma. Para tal, foi utilizada a formula seguinte:

$$R_{\text{tração}} = [Y_s \times (h_v + h_s) \times b \times \text{tag } \alpha] + (Y_s \times L \times h_s \times \text{tag } \alpha)$$

Onde:

$R_{\text{tração}}$ – Força máxima de tração admissível na geomembrana (15kN/m) ;

Y_s – Peso específico da camada de impermeabilização (21 KN / m³);

h_s – Altura da camada sobre a vala (m) (assume-se 0,80 m);

h_v – Altura da vala (m) (assume-se 0,80 m) ;

b – Largura da vala (m).

L – Comprimento entre a crista do talude e a vala de amarração (m) (assume-se 1,00 m)

α – Ângulo de atrito no contato com o geossintético (20)°

A aplicação da formula apresentada conduz aos resultados apresentados na Tabela 18.

Tabela 24 - Características da vala de amarração dos geossintéticos

Propriedade	Valor
Profundidade - h_v (m)	0,80
Comprimento entre a crista do talude e a vala de amarração - L (m)	1,0
Largura da vala - b (m)	0,80
Altura da camada sobre a vala - h_s (m)	0,80

- Célula de confinamento

A amarração dos geossintéticos pode ser feita ao nível das banquetas (Figura 65) ou ao nível da crista dos taludes (Figura 66).

Na amarração dos geossintéticos a nível das banquetas, o princípio implementado é exatamente o mesmo da amarração na crista do talude, sendo as forças mobilizadas de igual forma. A única particularidade digna de referência para este caso, é o fecho da vala de amarração, que é feito com recurso a solo selecionado envolto em geotêxtil.

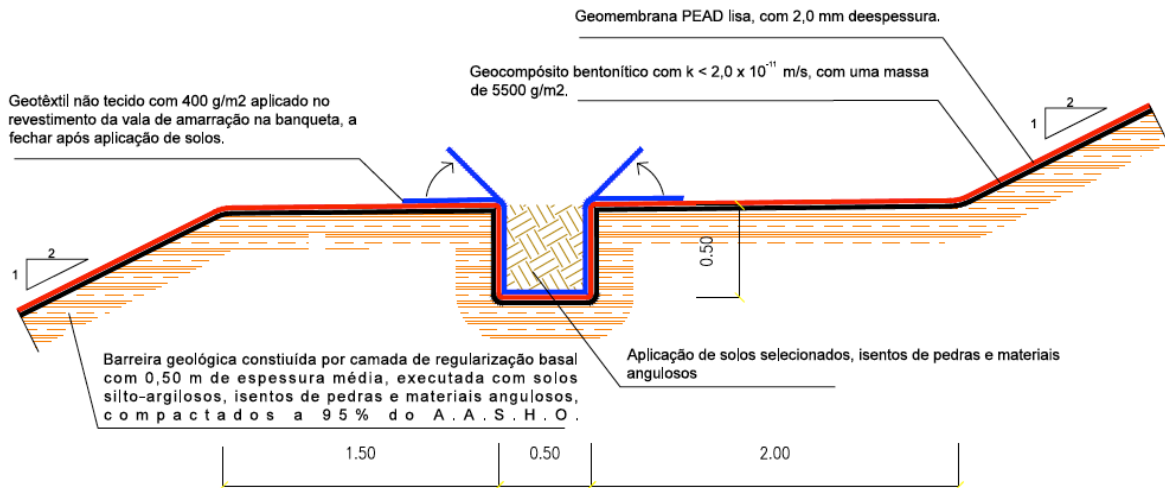
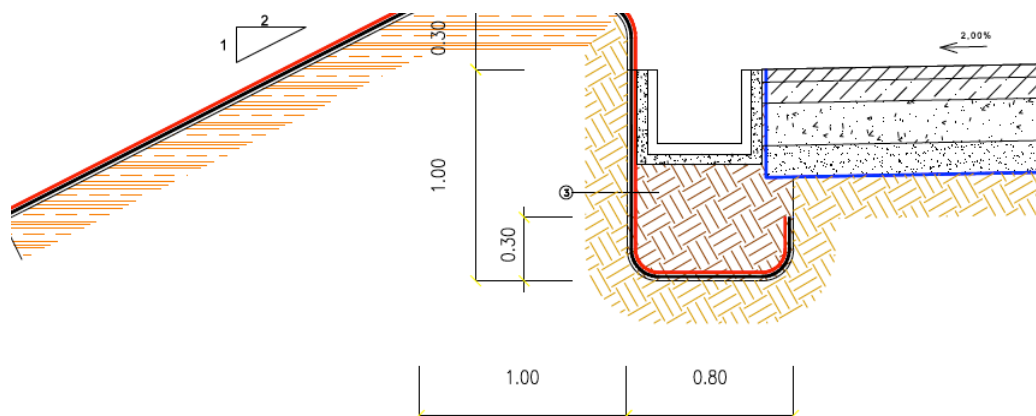


Figura 65 - Pormenor de amarração de geossintéticos ao nível das banquetas

Em ambos os casos, as dimensões das valas de amarração são diferentes das resultantes do processo de dimensionamento, como visível nas figuras. No entanto, estas garantem a correta amarração dos geossintéticos.



1-Geocompósito bentonítico com $k < 2,0 \times 10^{-11}$ m/s, com uma massa de 5500 g/m2.

2-Geomembrana PEAD lisa, com 2,0 mm de espessura.

3-Aplicação de solos selecionados, isentos de pedras e materiais angulosos

Figura 66- Pormenor de amarração de geossintéticos na crista de talude/intersecção com a via de circulação circundante da célula.

- Lagoas de efluente bruto, tratado e tempestade

Nas lagoas da estação de tratamento de lixiviados a amarração dos geossintéticos do sistema de impermeabilização das mesmas é feita na sua bordadura, seguindo o que acontece na célula de confinamento. No entanto, a vala de amarração nesta zona apresenta uma largura superior devido à inclusão da fundação do murete de alvenaria que circunda as lagoas. A Figura 67 apresenta-se o pormenor da vala de amarração na nas lagoas da estação de tratamento de lixiviados.

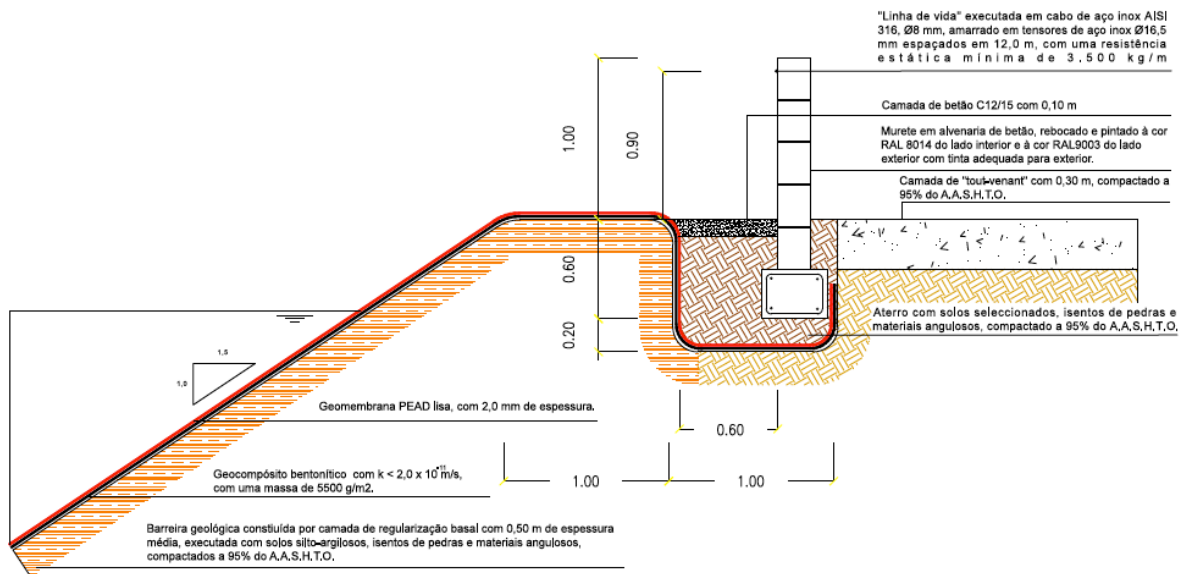


Figura 67-Pormenor da vala de amarração de geossintéticos das lagoas.

4.6. Drenagem de lixiviados

A produção de lixiviados em aterros de resíduos acontece, como já referido, como resultado do processo de decomposição dos resíduos depositados e devido a contaminação das águas infiltradas na célula de confinamento. No caso em estudo, a drenagem de lixiviados na célula de confinamento encontra-se dividida em duas redes, a rede de drenagem de lixiviados da zona basal e rede de drenagem periférica ou rede de drenagem de lixiviados dos taludes da célula.

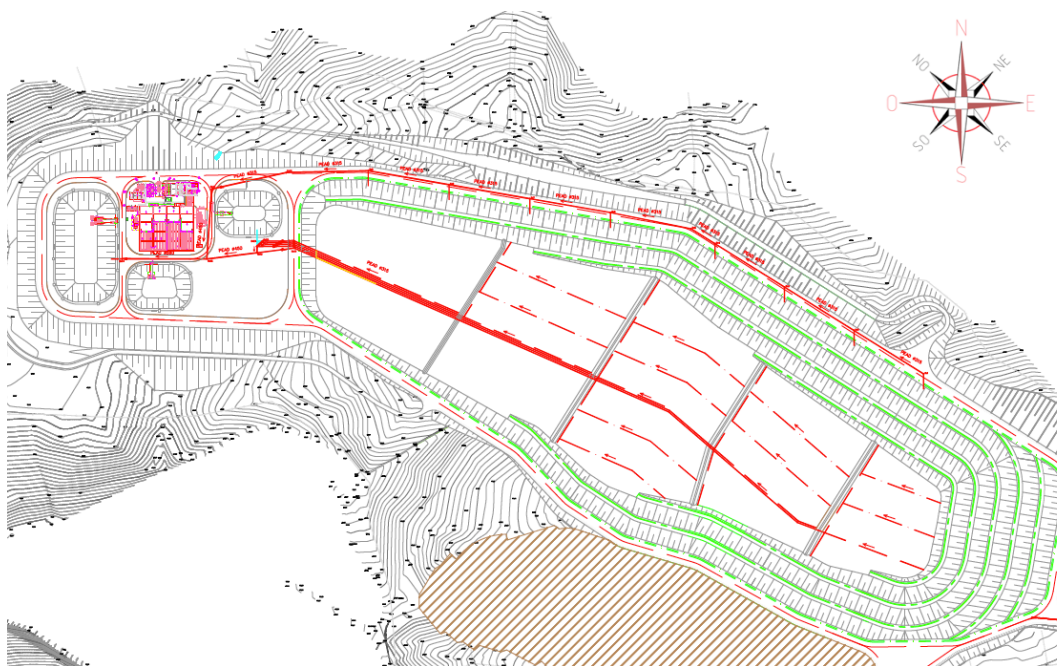


Figura 68 – Configuração dos sistema de drenagem de lixiviados.

4.6.1. Determinação de caudal

O dimensionamento destas redes depende, naturalmente, da estimativa de caudal gerado. A determinação do caudal é efetuada em relação a cada alvéolo da célula de confinamento. Para tal, devem ser avaliados o volume de resíduos presente em cada alvéolo, a precipitação e a evaporação. O cálculo do caudal de lixiviados pode ser realizado através da seguinte expressão:

$$Q_{\text{lixiviados}} = h_{\text{RU}i} + P_i - \text{Ev}p_i$$

Sendo:

$h_{\text{RU}i}$ - Volume de água proveniente da massa de resíduos urbanos confinados para o ano i;

P_i - A precipitação média do ano i;

$\text{Ev}p_i$ – Evaporação média do ano i.

O volume de água proveniente da massa de resíduos varia em função da sua constituição e da humidade relativa a cada categoria de resíduos. A Figura 69 expõe a percentagem de humidade por classe de resíduo.

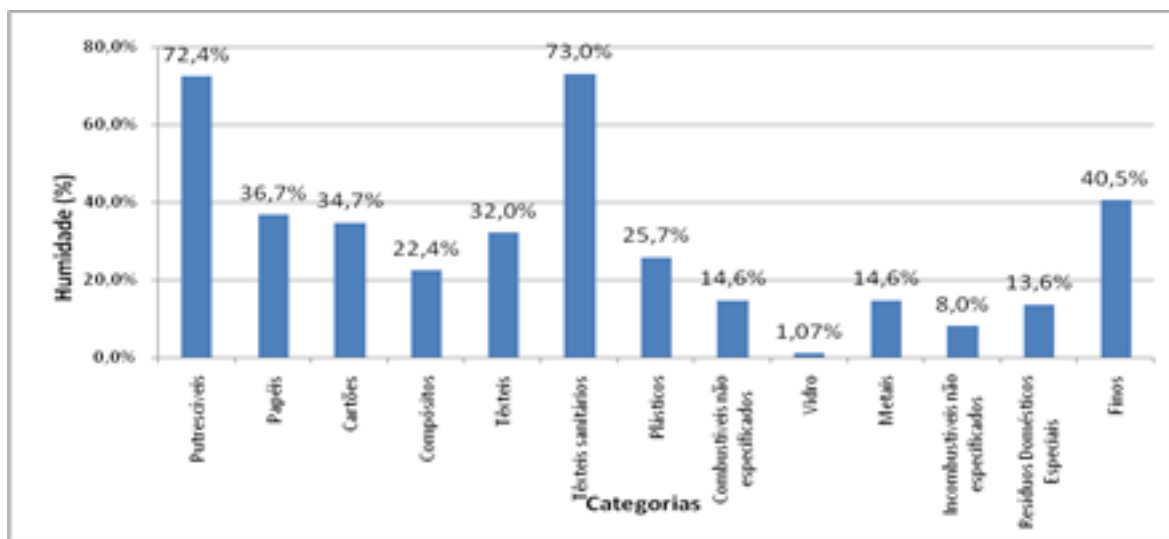


Figura 69 – Percentagem de humidade relativa a cada tipo de resíduo.

O cálculo da humidade média presente nos resíduos é feito com recurso a expressão seguinte:

$$\text{Humidade média (\%)} = \sum C_i \times h_i$$

Sendo:

C_i – Relevância da categoria de resíduos na massa de resíduos confinada (%);

h_i – Humidade média da categoria C_i .

Posto isto, o cálculo do volume de água presente na massa de resíduos, faz-se à custa do produto da humidade média pelo volume de resíduos previsto para o ano horizonte. No entanto, deverá proceder-se a uma correção deste valor devido a capacidade que os

resíduos possuem de reter a humidade, designada por capacidade de campo. No dimensionamento da rede de drenagem de lixiviados da zona basal do caso em estudo considerou-se um valor de 18% para a capacidade de campo da massa de resíduos.

A quantificação da precipitação capaz de gerar lixiviados foi feita recorrendo a dados meteorológicos para a região de implementação do aterro e tendo em consideração a área da massa de resíduos exposta a essa precipitação. A política da implementada pela Suldouro, S.A., permite reduzir a zona de exposição de resíduos apenas à frente de trabalho, pois a restante área da massa de resíduos é provisoriamente encerrada, minimizando a infiltração. Desta forma, para o a quantificação do volume de precipitação anual, foi considerada uma área de exposição de 1 ha.

A consideração da evaporação para o cálculo do caudal médio é ignorada, resultando, assim, como fator de segurança.

Para o cálculo do caudal de ponta considerou-se um período de retorno de 10 anos, dadas as inclinações identificadas na zona da célula, a área impermeabilizada e a existência de uma lagoa de tempestade que efetua a regularização dos caudais pluviais promovendo a sua entrega controlada no meio natural. Relativamente à caracterização da precipitação, recorreu-se uma análise dos valores de precipitação da estação climatológica de Porto/Serra do Pilar para o período 1951-1980, verificando-se um precipitação máxima diária e média diária de 101,2 mm e 3,38 mm respetivamente.

4.6.2. Dimensionamento do sistema

O sistema de drenagem de lixiviados da zona basal apresenta uma configuração ramificada, que converge para um único tubo que encaminha os lixiviados para a estação de tratamento.

Todo o sistema de drenagem de lixiviados é feito com recurso a tubagens em PEAD, sendo estas ranhuradas a 120° na rede de drenagem da zona basal.

A rede de drenagem da zona basal é essencialmente constituída pelos seguintes elementos:

- Tubagens em Polietileno de Alta Densidade (PEAD);
- Geotêxtil não tecido 400 g/m²;
- Camada mineral drenante com 0,5m de espessura.

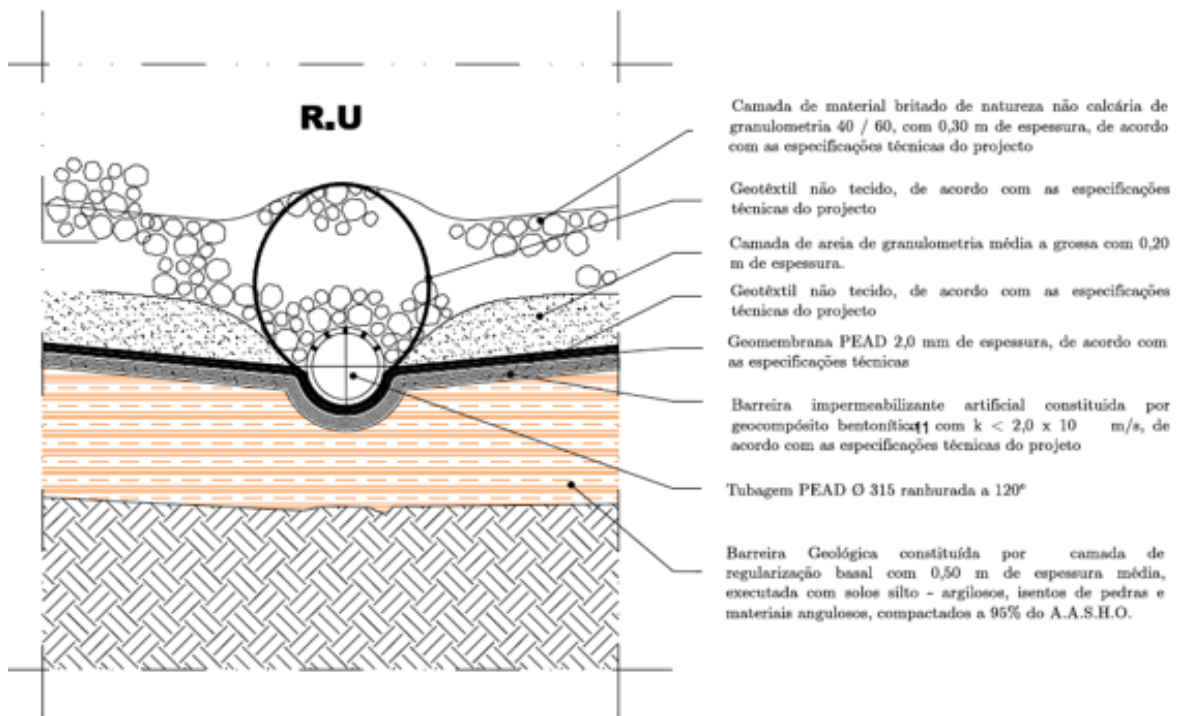


Figura 70 –Pormenor do sistema de drenagem de lixiviados.

O dimensionamento da tubagem de PEAD a implementar baseou-se na experiência de execução deste tipo de sistemas em obras semelhantes, tendo-se optado por um diâmetro nominal mínimo de Ø315 mm, de forma a evitar a colmatção dos drenos por parte dos finos arrastado no fundo do aterro.

Desta forma, e como a escolha do diâmetro da tubagem a implementar se baseou apenas na experiência em obras do semelhantes, há a necessidade de verificação da capacidade de drenagem de todo o sistema.

A capacidade de drenagem da tubagem foi avaliada através da fórmula de *Manning-Strickler*:

$$Q = K_s \times S \times R^{2/3} \times i^{1/2}$$

Onde:

Q – Caudal máximo (m³/s)

K_s – Coeficiente de *Manning-Strickler*

S – Secção da tubagem (m²)

R – Raio Hidráulico (m)

Tabela 25 – Coeficientes de Manning-Strickler para diversos materiais.

Material	Ks (m ^{1/3} /s)
Fibrocimento	90
Ferro Fundido não revestido	60
Ferro Fundido Revestido	70
Aço sem soldadura ou com rebitagem simples	65
Aço Soldado	90
Betão liso	75
PVC	110
PEAD	125

Adaptado de (Sá Marques & Sousa, 2011)

O geotêxtil não tecido aplicado a envolver a camada drenante e a tubagem possui um coeficiente de permeabilidade $k=30 \text{ L/s.m}^2$ tendo uma secção de $S=0,4074 \text{ m}^2$.

A capacidade drenante do agregado da camada mineral foi avaliada através da Lei de Darcy, aplica a escoamentos em meios porosos.

$$Q = k \times S \times i$$

Onde:

Q – Caudal máximo (m³/s);

K – Coeficiente de permeabilidade do material;

S – Secção de drenagem (m²);

i – Perda de carga unitária (m/m).

No entanto, esta formula não é de aplicação direta, pois a camada drenante é estratificada, encontrando-se na parte inferior desta 0,20 m de areia de granulometria grossa ($k_{\text{areia}} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$) e os restantes 0,30 m com brita de granulometria 40/60 ($k_{\text{brita}} = 1,0 \times 10^{-1} \text{ m/s}$), sendo necessário o cálculo de um coeficiente de permeabilidade equivalente, de forma a homogeneizar a camada. Para tal utilizou-se a formula:

$$K_{\text{equivalente}} = \frac{\sum k_i \times d_i}{\sum d_i}$$

Onde:

k_i – Coeficiente de permeabilidade da camada i (m/s);

d_i – Espessura da camada i (m).

Tabela 26 – Coeficientes de permeabilidade para materiais.

Tipo de solo	K(m/s)
Cascalhos Limpos	>10-2
Areia grossa	10-2 a 10-3
Areia media	10-3 a 10-4
Areia fina	10-4 a 10-5
Areia siltosa	10-5 a 10-6

Siltos	10-6 a 10-8
Argilas	10-8 a 10-10

Adaptado de (Matos Fernandes, 2008)

Encontrado o coeficiente de permeabilidade equivalente, foi possível então o cálculo da capacidade de drenagem do camada de mineral subjacente aos drenos.

Uma avaliação da permeabilidade do conjunto (dreno, geotêxtil, camada mineral) e do respetivo caudal possível de drenar, verifica-se que este é superior ao caudal de ponta calculado sendo valido o dimensionamento da tubagem baseada em experiências similares.

Outro ponto importante do sistema de drenagem de lixiviados é o espaçamento dado entre drenos. Drenos demasiado espaçados proporcionam um aumento da altura de lixiviados na base do aterro, provocando um aumento do gradiente hidráulico. O aumento da altura de lixiviados no aterro provoca, também, um aumento da pressão sobre a base do aterro e, conseqüentemente, sobre o sistema de impermeabilização e de drenagem, aumentando a probabilidade de colmatação e rotura destes e a ocorrência de fugas. A colocação de drenos demasiado próximos poderá atenuar os problemas atrás referidos. No entanto, aumenta o custo do sistema.

No caso em estudo, o dimensionamento do espaçamento entre drenos na zona basal foi realizado tendo em conta uma altura máxima de lixiviados de 5,0 cm, correspondente a 10% espessura da camada drenante. Para tal foi utilizada a formula proposta por Richardson and Koerner (1987).

$$hc = \frac{D \times \sqrt{S}}{2} \left[\frac{\tan^2 \alpha}{S} + 1 - \frac{\tan \alpha}{S} \sqrt{\tan^2 \alpha + S} \right]$$

Onde:

hc – altura máxima de lixiviados entre drenos adjacentes (0,05m);

tan α - inclinação dos drenos na zona basal (2%, inclinação mínima regulamentar para o fundo do aterro);

D – distancia entre drenos consecutivos;

$S = \frac{q}{K}$ (adimensional);

K – permeabilidade da camada drenante;

q – caudal máximo a drenar.

A utilização da desta formula leva a um afastamento entre drenos de cerca de 27 m, no entanto, foram considerados apenas 25 m, resultantes da observação de obras similares.

4.7. Análise de custo da solução prevista em projeto

Historicamente, a deposição de resíduos durante vários anos foi realizada de forma indiscriminada em “aterros”, se é que assim se podem chamar, sem qualquer proteção relativamente ao meio envolvente e a sistemas de drenagem e tratamento dos lixiviados produzidos. Esta prática, por desconhecimento de soluções, por falta de recursos para implementação dessas mesmas soluções de proteção, ou mesmo por falta de uma consciencialização ambiental, levou ao aparecimento de problemas ambientais visíveis essencialmente através da contaminação de solos e linhas de água.

Nas ultimas duas décadas, nomeadamente em Portugal, uma tomada de consciência ambiental levou a criação e aplicação de legislação com o intuito de por fim a este tipo de prática.

A mudança de estratégia, introduz em Portugal, a partir da aplicação do primeiro PERSU, o conceito de aterro de resíduos, pondo fim aos locais de deposição designados de lixeiras. A metodologia adoptada para a mudança de prática acarretou dois tipos de custos: os custos diretamente ligados ao enceramento de lixeiras, e os custos inerentes à construção de novas infraestruturas para deposição de resíduos. No primeiro caso, os custos associam-se à limpeza e contenção da área até então utilizada como depósito de resíduos, bem como ao inevitável processo de descontaminação dos solos, ao passo que os custos relativos às novas instalações se prendem com a construção de sistema de confinamento e tratamento de resíduos e águas contaminadas, minimizando os riscos ambientais associados ao processo de deposição.

Como será de fácil compreensão, os custos inerentes à construção e manutenção de um aterro de resíduos, comparativamente às lixeiras até então utilizadas, são em muito superiores, dada à sua complexidade de sistemas e das instalações que deste fazem parte.

De acordo com o Decreto Lei n.º 183/2009, de 10 de agosto, os aterros de resíduos devem possuir uma série de requisitos que permitam controlar as emissões e a proteção de solo e águas. Estes requisitos preveem a construção de sistemas de proteção ambiental ativo e passivo.

Posto isto, e dada a configuração normal de um aterro de resíduos, torna-se essencial o correta projeto dos sistemas de proteção ambiental passivo e ativo. É conveniente, no entanto, referir a importância assumida também pelo sistema de selagem final do aterro, bem como pelas instalações e infraestruturas de apoio ao mesmo sendo, contudo no presente trabalho, dada a sua natureza, tratados os pontos associados apenas aos sistemas de proteção ambiental.

Os sistemas de proteção ambiental, nomeadamente o passivo, têm vindo a sofrer ligeiras modificações, indo ao encontro da evolução de técnicas e materiais, tal como é o caso dos geossintéticos. A título de exemplo, pode referir-se a utilização de geocompósitos bentoníticos em detrimento das barreiras de argila compactada, utilizadas como reforço das características insuficientes apresentada pela barreira geológica natural. A utilização destes geossintéticos permite um desempenho mais eficaz, com menor espessura de camada e custo. A título de exemplo, apresenta-se, na Figura 71, o esquema do sistema de impermeabilização de um aterro sanitário projetado em 1993, de forma a permitir a visualização da evolução destes sistemas comparativamente ao utilizado no caso de estudo. Os sistemas de proteção ambiental ativo e passivo utilizado no caso em estudo, são do tipo tradicional, obedecendo ao descrito na legislação, tendo sido já referidas as suas constituições anteriormente.

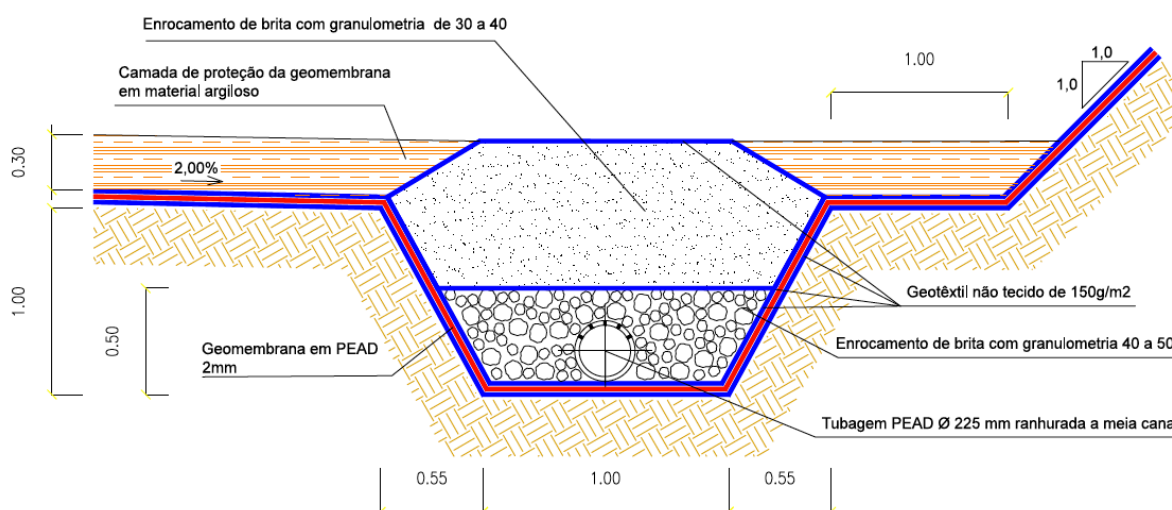


Figura 71 – Exemplo do sistema de impermeabilização do aterro intermunicipal da AMTSM (Associação de Municípios de Terras de Santa Maria) datado de 1993.

De forma a verificar, também, economicamente a importância destes sistemas, realizou-se uma análise de custo da construção dos mesmos, tendo sido excluídos desta o sistema de drenagem de águas pluviais e o sistema de drenagem e tratamento da recolha de biogás. Esta análise foca-se, essencialmente, no sistema utilizado para a impermeabilização da célula e lagoas de efluentes e pluviais, bem como no sistema de recolha de lixiviados. Na Tabela 27 são apresentados as quantidades e custo de material utilizado, estando também incluídos todos os custos inerentes à aplicação dos referidos materiais (preços atualizados pela empresa dst,s.a em de 2014).

Tabela 27- Análise de custos sistema de impermeabilização e recolha de lixiviados aplicado no novo aterro de resíduos da Suldouro.

Descrição	Quantidade	Un.	C. unitário (€)	C. total (€)
Sistema de Impermeabilização - Barreira Passiva e Barreira Ativa				
Impermeabilização da zona basal e taludes da célula de confinamento, incluindo desperdícios, soldaduras, verificação da conformidade das soldaduras, amarrações e sobreposições e todos os trabalhos, constituída por:				
Barreira Passiva				
Execução da camada de regularização basal com 0,50 m de espessura média, com solos resultantes da escavação, isento de pedras ou materiais angulosos, incluindo regularização e compactação dos mesmos até 95% do A.A.S.H.O, em camadas que não ultrapassem 0,20 m de espessura	51222	m ³	1,55	79.394,10
Fornecimento e colocação de geocompósito bentonítico, com 5500g/m ²	102444	m ²	2,77	283.770,00
Barreira Ativa				
Fornecimento e colocação de geomembrana lisa de PEAD, com 2,0 mm de espessura	102444	m ²	3,36	344.212,00
Fornecimento e colocação de geotêxtil não tecido 400 g/m ² , com função de proteção mecânica	61050	m ²	1,02	62.271,00
Camada de areia de granulometria 0,18/2,0 mm com 0,20 m de espessura	11107	m ³	16,97	188.486,00
Camada de brita de natureza não calcária ou de rochas provenientes da escavação, de natureza não calcária, de granulometria 40/60 com 0,30 m de espessura	16661	m ³	18,72	311.894,00
Fornecimento e assentamento de lajetas de betão simples na cor natural, autoblocantes tipo (UNI), incluindo todos os trabalhos	25	m ²	7,22	180,50
Execução das valas de amarração dos geossintéticos, incluindo todos os trabalhos necessários:				
Amarração dos geossintéticos nas valas a executar nas banquetas:				
Escavação para abertura de vala com 0,50 x 0,50 (largura x profundidade), em solo de qualquer natureza	2554	ml	1,05	2.681,70
Aterro da vala de amarração com solos provenientes da escavação, isentos de pedras e materiais angulosos	639	m ³	2,53	1.616,67

Fornecimento e colocação de geotêxtil não tecido 300 g/m ² , com função de proteção mecânica	5517	m ²	0,70	3.861,90
Amarração dos geossintéticos na vala de crista de talude:				
Escavação para abertura de vala com 0,80 x 1,00 (largura x profundidade), em solo de qualquer natureza	1414	ml	3,36	4.751,04
Aterro da vala de amarração com solos provenientes da escavação, isentos de pedras e materiais angulosos	1131	m ³	2,53	2.861,43
Fornecimento e colocação de geomembrana lisa de PEAD, com 2,0 mm de espessura	4495	m ²	3,36	15.103,20
Fornecimento e colocação de geocompósito bentonítico com 5500g/m ²	4495	m ²	2,77	12.451,20
LAGOAS DE REGULARIZAÇÃO				
Lagoa de regularização de lixiviados				
Impermeabilização da lagoa, incluindo desperdícios, soldaduras, amarrações e sobreposições, constituída por:				
Execução da camada de regularização basal com 0,50 m de espessura média, com solos resultantes da escavação, isento de pedras ou materiais angulosos, incluindo regularização e compactação dos mesmos até 95% do A.A.S.H.O, em camadas que não ultrapassem 0,20 m de espessura	1851,5	m ³	2,28	4.221,42
Fornecimento e colocação de geocompósito bentonítico, com 5500 g/m ²	4035	m ²	2,77	11.177,00
Fornecimento e colocação de geomembrana lisa de PEAD, com 2,0 mm de espessura	4035	m ²	3,36	13.557,60
Fornecimento e execução de amarração dos geossintéticos no dique periférico da lagoa, conforme desenho de pormenor, incluindo todos os trabalhos necessários:				
Escavação para abertura de vala com (1,00 x 0,80 m), em solo de qualquer natureza	231	ml	3,36	776,16
Aterro da vala de amarração com solos selecionados, isentos de pedras e materiais angulosos, incluindo todos os trabalhos	184,1	m ³	2,53	465,77
Lagoa de regularização de efluente tratado				
Impermeabilização da lagoa, incluindo desperdícios, soldaduras, amarrações e sobreposições, constituída por:				
Execução da camada de regularização basal com 0,50 m de				

espessura média, com solos resultantes da escavação, isento de pedras ou materiais angulosos, incluindo regularização e compactação dos mesmos até 95% do A.A.S.H.O, em camadas que não ultrapassem 0,20 m de espessura	851,5	m ³	1,55	1.319,83
Fornecimento e colocação de geocompósito bentonítico, com 5500 g/m ²	1730	m ²	2,77	4.792,10
Fornecimento e colocação de geomembrana lisa de PEAD, com 2,0 mm de espessura	1730	m ²	3,36	5.812,80
Fornecimento e execução de amarração dos geossintéticos no dique periférico da lagoa, incluindo todos os trabalhos necessários:				
Escavação para abertura de vala com (1,00 x 0,80 m), em solo de qualquer natureza	144	ml	3,36	483,84
Aterro da vala de amarração com solos selecionados, isentos de pedras e materiais angulosos, incluindo todos os trabalhos	115,2	m ³	2,53	291,45
Lagoa de tempestade				
Impermeabilização da área basal da lagoa, incluindo desperdícios, soldaduras, amarrações e sobreposições, constituída por:				
Fornecimento e colocação de geomembrana lisa de PEAD, com 2,0 mm de espessura	1990	m ²	3,36	6.686,40
Fornecimento e execução de amarração dos geossintéticos no dique periférico da lagoa, incluindo todos os trabalhos necessários:				
Escavação para abertura de vala com (1,00 x 0,80 m), em solo de qualquer natureza	144	ml	3,36	483,84
Aterro da vala de amarração com solos selecionados, isentos de pedras e materiais angulosos, incluindo todos os trabalhos	115,2	m ³	2,53	291,45
Execução da rede de drenagem de lixiviados, incluindo fornecimento e assentamento de tubagens e acessórios, soldaduras e desperdícios				
Fornecimento e assentamento de tubagem em PEAD, PN10, no interior da zona de confinamento, incluindo abertura e fecho de vala, em conformidade com as especificações do caderno de encargos				
Ø315, ranhurada a 120°	1355	ml	39,10	52.980,50
Ø315, cega	1591	ml	25,44	40.475,04
Execução de impermeabilização nos atravessamentos de				

telas, incluindo escavação e aterro para execução dos trabalhos, soldadura a cordão e todos os trabalhos necessários, para tubagem em PEAD, PN10, Ø315.	25	un	139,50	3.487,50
Fornecimento e assentamento de tubagem em PEAD, PN10, no exterior da zona de confinamento, incluindo abertura e fecho de vala, em conformidade com as especificações do caderno de encargos				
Ø315	750	ml	25,44	19.080,00
Ø450	95	ml	91,21	8.664,95
Ø560	70	ml	150,35	10.524,50
Fornecimento e instalação de caixas de visita em PEAD, Ø1000, incluindo tampa em ferro fundido, escavação a uma altura não superior a 2,50 m, em conformidade com as especificações do caderno de encargos	11	un	1241,07	13.651,80
Fornecimento e instalação de caixas de visita em PEAD, Ø1000, incluindo tampa em ferro fundido, escavação a uma altura não superior a 6,00 m, em conformidade com as especificações do caderno de encargos	12	un	2034,61	24.415,30
Fornecimento e instalação de caixas de visita executadas em anéis de betão simples, Ø1000, incluindo tampa em ferro fundido, escavação a uma altura não superior a 6,00 m, em conformidade com as especificações do caderno de encargos	1	un	806,03	806,03
Execução de caixas para instalação de válvula de cunha elástica, incluindo todos os fornecimentos, instalações e acessórios:				
Escavação para implantação de caixa em solo de qualquer natureza	24	ml	2,28	54,72
Fornecimento e execução de caixa em tubos de betão armado Ø1600, incluindo vedantes e todos os trabalhos	6	un	677,32	4.063,92
Execução de laje (3,0mx3,0m) em betão C20/25 armado com aço A400NR, incluindo cofragem, descofragem, juntas de betonagem sempre que necessário, pinturas e todos os trabalhos	10,8	m ³	117,67	1.270,84
Fornecimento e instalação de tampas em PRV	6	un	324,24	1.945,44
Válvula de cunha elástica Ø300, PN10, em ferro fundido dúctil com revestimento epóxico, cunha revestida a NBR, vedantes substituíveis em carga e fuso em aço inox AISI 316 L, adequada a águas residuais, incluindo apoio	6	un	1064,72	6.388,32
Fornecimento e instalação de conjunto de manobra telescópico para válvula Ø300, completo, incluindo, noz,		un		

dado, volante e braço até uma altura de 10 cm da tampa da caixa	6		1295,46	7.772,76
Degraus regulamentares em aço revestidos a polipropileno	36	un	2,82	101,52
Fornecimento e instalação de válvula mural Ø350 em caixa de visita PEAD, com revestimento epóxico, obturador redondo e fuso em aço inox AISI 316 L	4	un	1339,19	5.356,76
Execução de caixa de retenção de areias em betão C35/45, classe de exposição XA3, armado com aço A400NR, incluindo cofragem, descofragem, juntas de betonagem sempre que necessário, pinturas e todos os trabalhos	4,75	m ³	211,52	1.004,72
Fornecimento para instalação nas caixas de retenção de areias de tampa em ferro fundido com proteção anticorrosiva da classe de carga D-400	4	un	81,78	327,12
Degraus regulamentares em aço revestidos a polipropileno	4	un	2,82	11,28
Execução e fornecimento de "cesto" para remoção de materiais flotáveis em material polimérico rígido e não oxidável Ø20, com perfuração retangular de 20 mm, incluindo todos os trabalhos	2	un	1259,26	2.518,52
Fornecimento e instalação de sistema de elevação do cesto de remoção de flotáveis em cabo de nylon de cor negra com 8,0 mm	20	m	3,77	75,40
Custo total do sistema de impermeabilização da célula de confinamento e lagoas da estação de tratamento de lixiviados				863.333,90
Custo total do sistema de drenagem de lixiviados				705.537,44
Custo total dos sistemas de proteção ambiental passivo e ativo (excluído o sistema de drenagem de águas pluviais e recolha e tratamento de biogás)				1.568.871,34

Tendo em consideração o custo total da construção da infraestrutura, que se estima ser de 10.829.542,25 €, e após a análise da tabela acima apresentada, pode concluir-se que o solução implementada para impermeabilização e drenagem de lixiviados corresponde a cerca 15% do valor total da obra. Dado o avultado valor inerente à aplicação deste tipo de solução, torna-se pertinente a averiguação da existência de uma solução alternativa que assegure os critérios funcionais em simultâneo com critérios económicos.

4.8. Solução alternativa ao sistema previsto em projeto

A aplicação de soluções alternativas, é um processo que possui algumas condicionantes, nomeadamente legislativas.

Mais uma vez, aliados à evolução dos geossintéticos, tem-se verificado a evolução destes sistemas, também em aspetos relativos à drenagem. Assim sendo, têm vindo a ser considerados sistemas onde se aplicam geocompósitos drenantes em detrimento dos

tradicionais drenos, e camada drenante. A utilização deste tipo de geossintético permite a substituição quase total dos drenos nos alvéolos, à exceção dos estritamente necessários para a recolha dos lixiviados por estes transportados, e a substituição parcial ou total da camada drenante.

A solução alternativa que agora se propõe é bastante semelhante à considerada em projeto, sendo representado um esquema da mesma na Figura 75. As principais modificações passam pela diminuição da espessura da camada de material britado para 0,20 m e substituição da camada de areia por uma camada constituída pela sobreposição de dois geocompósitos drenantes, que asseguraram a recolha dos lixiviados e o seu encaminhamento para os drenos de recolha.

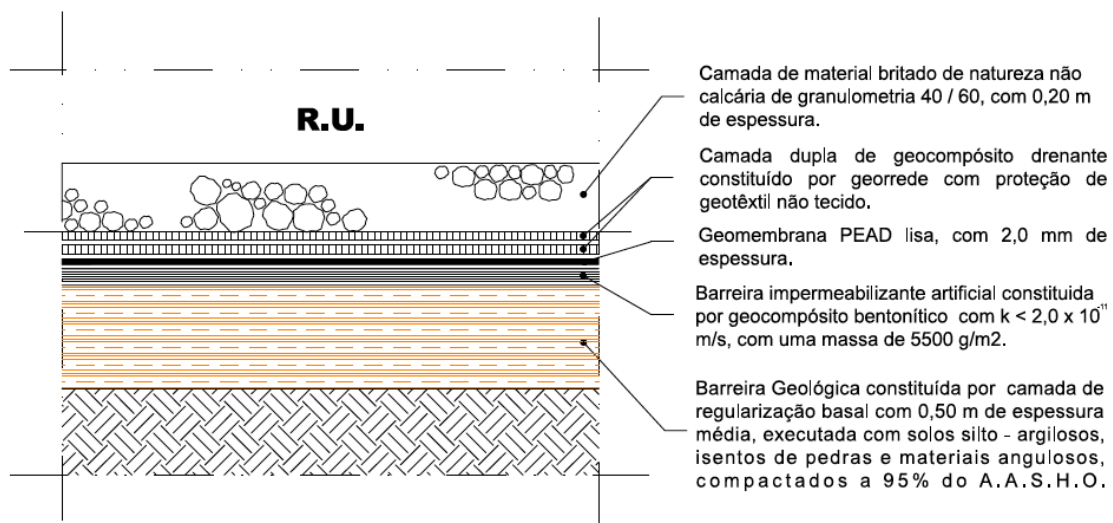


Figura 72- Pormenor do sistema de impermeabilização proposto

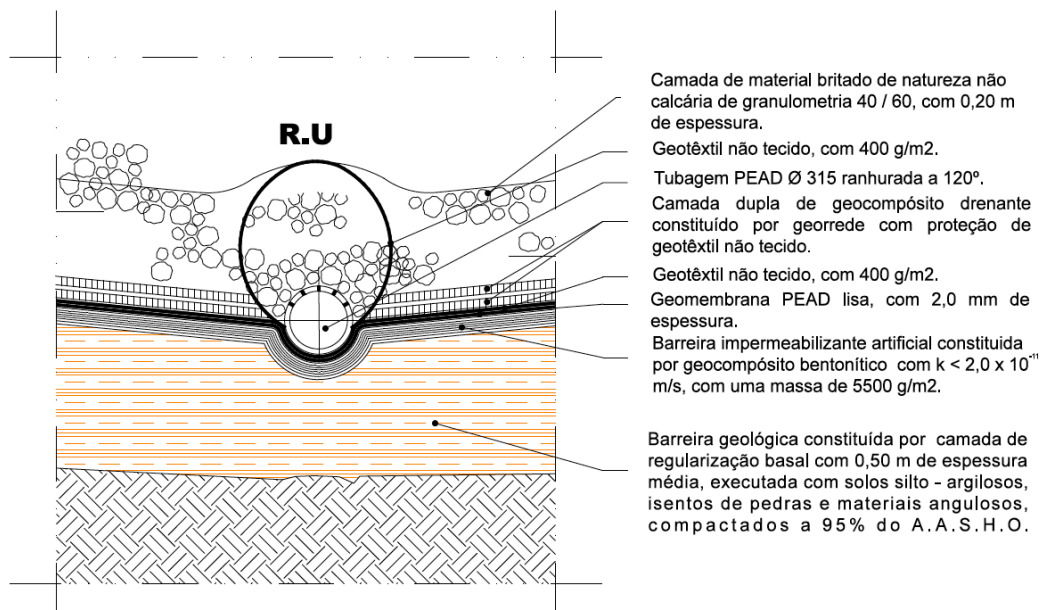


Figura 73- Pormenor do dreno de recolha da solução proposta

A Figura 73 representa o esquema propostos para o sistema de drenagem de lixiviados, que é também semelhante ao proposto em projeto, tendo apenas sido efetuadas as alterações já referidas para o sistema de impermeabilização.

Posto isto, procede-se à determinação do espaçamento entre os drenos de recolha, sendo este procedimento realizado de forma similar ao definido em projeto.

Determinação do $K_{\text{equivalente}}$

$$K_{\text{equivalente}} = \frac{\sum k_i \times d_i}{\sum d_i}$$

Onde,

$$k_{\text{brita}} - 1,0 \times 10^{-1} \text{ m/s}$$

$$d_{\text{brita}} - 0,20 \text{ m}$$

$$k_{\text{geocompósito}} - 3,0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$d_{\text{geocompósito}} - 0,015 \text{ m}$$

A utilização da formula com os valores apresentados, leva à determinação de um $K_{\text{equivalente}} = 9,95 \times 10^{-2} \text{ m/s}$.

A determinação do espaçamento entre drenos é feita com recurso à formula proposta por Richardson and Koerner (1987):

$$hc = \frac{D \times \sqrt{S}}{2} \left[\frac{\tan^2 \alpha}{S} + 1 - \frac{\tan \alpha}{S} \sqrt{\tan^2 \alpha + S} \right]$$

A utilização desta formula pressupõe a determinação de S , sendo este o cociente entre o caudal máximo a drenar ($1,17 \times 10^{-6} \text{ m/s}$) e o coeficiente de permeabilidade equivalente ($9,95 \times 10^{-2} \text{ m/s}$). Deste cociente resulta um $S = 1,18 \times 10^{-5}$.

Assim sendo, na fórmula acima referida :

hc – altura máxima de lixiviados entre drenos adjacentes (0,05 m);

tan α - inclinação dos drenos na zona basal (2%, inclinação mínima regulamentar para o fundo do aterro);

D – distancia entre drenos consecutivos;

$S = \frac{q}{K}$ (adimensional);

K – permeabilidade da camada drenante;

q – caudal máximo a drenar.

Com a aplicação, na formula, dos valores referidos, obtém-se um $D = 57 \text{ m}$. Assim sendo, pode alterar-se a configuração inicialmente definida para o sistema de drenagem de lixiviados, propondo-se a solução demonstrada na Figura 74.

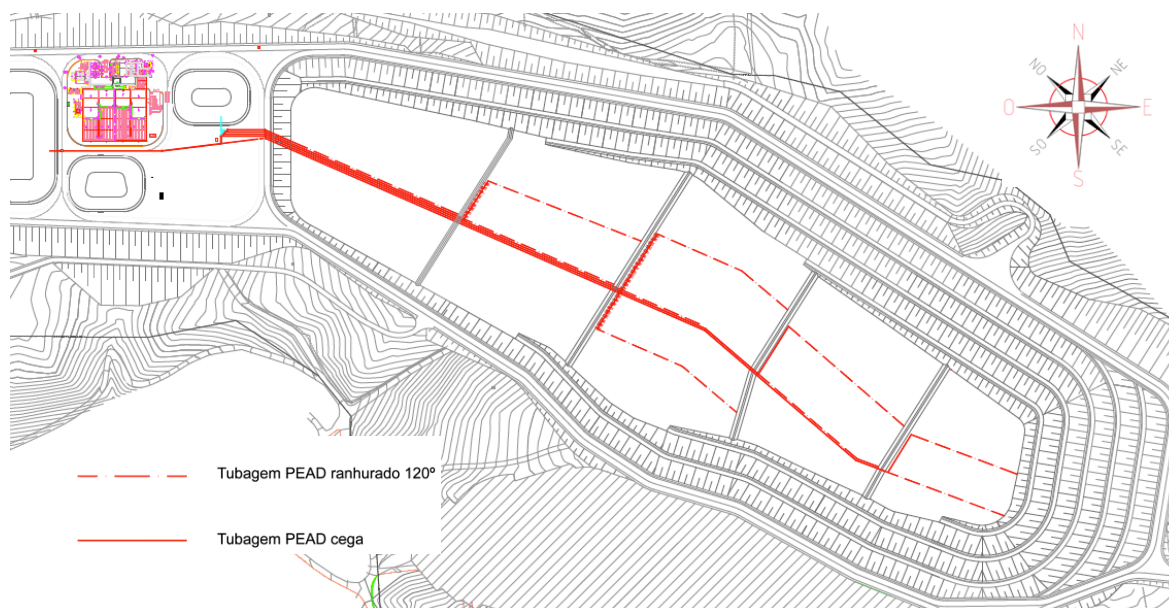


Figura 74 –Configuração do sistema de drenagem com o novo sistema de recolha

A proposta desta solução tem como principal objetivo, proporcionar uma redução do custo associado à execução da mesma, salvaguardando sempre os requisitos de funcionalidade e qualidade do sistema de execução. Assim sendo apresentam-se na Tabela 28 os custos associados à solução proposta (preços atualizados pela empresa dst,s.a em de 2014).

Tabela 28 – Custos associados à execução da solução proposta.

Descrição	Quantidade	Un.	C. unitário (€)	C. total (€)
Sistema de Impermeabilização - Barreira Passiva e Barreira Ativa				
Impermeabilização da zona basal e taludes da célula de confinamento, incluindo desperdícios, soldaduras, verificação da conformidade das soldaduras, amarrações e sobreposições e todos os trabalhos, constituída por:				
Barreira Passiva				
Execução da camada de regularização basal com 0,50 m de espessura média, com solos resultantes da escavação, isento de pedras ou materiais angulosos, incluindo regularização e compactação dos mesmos até 95% do A.A.S.H.O, em camadas que não ultrapassem 0,20 m de espessura	51222	m ³	1,55	79.394,10
Fornecimento e colocação de geocompósito bentonítico, com 5500g/m2	102444	m ²	2,77	283.770,00
Barreira Ativa				

Fornecimento e colocação de geomembrana lisa de PEAD, com 2,0 mm de espessura	102444	m ²	3,36	344.212,00
Fornecimento e colocação de geotêxtil não tecido 400 g/m ² , com função de proteção mecânica na zona de colocação dos drenos	6601,05	m ²	1,02	6.733,07
Fornecimento e aplicação de geocompósito drenante constituído por georrede protegida com geotêxtil não tecido com 400g/m ²	111066	m ³	3,36	365.407,14
Camada de brita de natureza não calcária ou de rochas provenientes da escavação, de natureza não calcária, de granulometria 40/60 com 0,20 m de espessura	11106	m ³	18,72	207.904,32
Fornecimento e assentamento de lajetas de betão simples na cor natural, autoblocantes tipo (UNI), incluindo todos os trabalhos	25	m ²	7,22	180,50
Execução das valas de amarração dos geossintéticos, incluindo todos os trabalhos necessários:				
Amarração dos geossintéticos nas valas a executar nas banquetas:				
Escavação para abertura de vala com 0,50 x 0,50 (largura x profundidade), em solo de qualquer natureza	2554	ml	1,05	2.681,70
Aterro da vala de amarração com solos provenientes da escavação, isentos de pedras e materiais angulosos	639	m ³	2,53	1.616,67
Fornecimento e colocação de geotêxtil não tecido 300 g/m ² , com função de proteção mecânica	5517	m ²	0,70	3.861,90
Amarração dos geossintéticos na vala de crista de talude:				
Escavação para abertura de vala com 0,80 x 1,00 (largura x profundidade), em solo de qualquer natureza	1414	ml	3,36	4.751,04
Aterro da vala de amarração com solos provenientes da escavação, isentos de pedras e materiais angulosos	1131	m ³	2,53	2.861,43
Fornecimento e colocação de geomembrana lisa de PEAD, com 2,0 mm de espessura	4495	m ²	3,36	15.103,20
Fornecimento e colocação de geocompósito bentonítico com 5500g/m ²	4495	m ²	2,77	12.451,20
LAGOAS DE REGULARIZAÇÃO				
Lagoa de regularização de lixiviados				
Impermeabilização da lagoa, incluindo desperdícios, soldaduras, amarrações e sobreposições, constituída por:				
Execução da camada de regularização basal com 0,50 m de				

espessura média, com solos resultantes da escavação, isento de pedras ou materiais angulosos, incluindo regularização e compactação dos mesmos até 95% do A.A.S.H.O, em camadas que não ultrapassem 0,20 m de espessura	1851,5	m ³	2,28	4.221,42
Fornecimento e colocação de geocompósito bentonítico, com 5500 g/m ²	4035	m ²	2,77	11.177,00
Fornecimento e colocação de geomembrana lisa de PEAD, com 2,0 mm de espessura	4035	m ²	3,36	13.557,60
Fornecimento e execução de amarração dos geossintéticos no dique periférico da lagoa, conforme desenho de pormenor, incluindo todos os trabalhos necessários:				
Escavação para abertura de vala com (1,00 x 0,80 m), em solo de qualquer natureza	231	ml	3,36	776,16
Aterro da vala de amarração com solos selecionados, isentos de pedras e materiais angulosos, incluindo todos os trabalhos	184,1	m ³	2,53	465,77
Lagoa de regularização de efluente tratado				
Impermeabilização da lagoa, incluindo desperdícios, soldaduras, amarrações e sobreposições, constituída por:				
Execução da camada de regularização basal com 0,50 m de espessura média, com solos resultantes da escavação, isento de pedras ou materiais angulosos, incluindo regularização e compactação dos mesmos até 95% do A.A.S.H.O, em camadas que não ultrapassem 0,20 m de espessura	851,5	m ³	1,55	1.319,83
Fornecimento e colocação de geocompósito bentonítico, com 5500 g/m ²	1730	m ²	2,77	4.792,10
Fornecimento e colocação de geomembrana lisa de PEAD, com 2,0 mm de espessura	1730	m ²	3,36	5.812,80
Fornecimento e execução de amarração dos geossintéticos no dique periférico da lagoa, incluindo todos os trabalhos necessários:				
Escavação para abertura de vala com (1,00 x 0,80 m), em solo de qualquer natureza	144	ml	3,36	483,84
Aterro da vala de amarração com solos selecionados, isentos de pedras e materiais angulosos, incluindo todos os trabalhos	115,2	m ³	2,53	291,45
Lagoa de tempestade				
Impermeabilização da área basal da lagoa,				

incluindo desperdícios, soldaduras, amarrações e sobreposições, constituída por:				
Fornecimento e colocação de geomembrana lisa de PEAD, com 2,0 mm de espessura	1990	m ²	3,36	6.686,40
Fornecimento e execução de amarração dos geossintéticos no dique periférico da lagoa, incluindo todos os trabalhos necessários:				
Escavação para abertura de vala com (1,00 x 0,80 m), em solo de qualquer natureza	144	ml	3,36	483,84
Aterro da vala de amarração com solos selecionados, isentos de pedras e materiais angulosos, incluindo todos os trabalhos	115,2	m ³	2,53	291,45
Execução da rede de drenagem de lixiviados, incluindo fornecimento e assentamento de tubagens e acessórios, soldaduras e desperdícios				
Fornecimento e assentamento de tubagem em PEAD, PN10, no interior da zona de confinamento, incluindo abertura e fecho de vala, em conformidade com as especificações do caderno de encargos				
Ø315, ranhurada a 120°	909	ml	39,10	35.541,90
Ø315, cega	1322	ml	25,44	33.631,68
Execução de impermeabilização nos atravessamentos de telas, incluindo escavação e aterro para execução dos trabalhos, soldadura a cordão e todos os trabalhos necessários, para tubagem em PEAD, PN10, Ø315.	25	un	139,50	3.487,50
Fornecimento e assentamento de tubagem em PEAD, PN10, no exterior da zona de confinamento, incluindo abertura e fecho de vala, em conformidade com as especificações do caderno de encargos				
Ø315	750	ml	25,44	19.080,00
Ø450	95	ml	91,21	8.664,95
Ø560	70	ml	150,35	10.524,50
Fornecimento e instalação de caixas de visita em PEAD, Ø1000, incluindo tampa em ferro fundido, escavação a uma altura não superior a 2,50 m, em conformidade com as especificações do caderno de encargos	11	un	1241,07	13.651,80
Fornecimento e instalação de caixas de visita em PEAD, Ø1000, incluindo tampa em ferro fundido, escavação a uma altura não superior a 6,00 m, em conformidade com as especificações do caderno de encargos	12	un	2034,61	24.415,30

Fornecimento e instalação de caixas de visita executadas em anéis de betão simples, Ø1000, incluindo tampa em ferro fundido, escavação a uma altura não superior a 6,00 m, em conformidade com as especificações do caderno de encargos	1	un	806,03	806,03
Execução de caixas para instalação de válvula de cunha elástica, incluindo todos os fornecimentos, instalações e acessórios:				
Escavação para implantação de caixa em solo de qualquer natureza	24	ml	2,28	54,72
Fornecimento e execução de caixa em tubos de betão armado Ø1600, incluindo vedantes e todos os trabalhos	6	un	677,32	4.063,92
Execução de laje (3,0mx3,0m) em betão C20/25 armado com aço A400NR, incluindo cofragem, descofragem, juntas de betonagem sempre que necessário, pinturas e todos os trabalhos	10,8	m ³	117,67	1.270,84
Fornecimento e instalação de tampas em PRV	6	un	324,24	1.945,44
Válvula de cunha elástica Ø300, PN10, em ferro fundido dúctil com revestimento epóxico, cunha revestida a NBR, vedantes substituíveis em carga e fuso em aço inox AISI 316 L, adequada a águas residuais, incluindo apoio	6	un	1064,72	6.388,32
Fornecimento e instalação de conjunto de manobra telescópico para válvula Ø300, completo, incluindo, noz, dado, volante e braço até uma altura de 10 cm da tampa da caixa	6	un	1295,46	7.772,76
Degraus regulamentares em aço revestidos a polipropileno	36	un	2,82	101,52
Fornecimento e instalação de válvula mural Ø350 em caixa de visita PEAD, com revestimento epóxico, obturador redondo e fuso em aço inox AISI 316 L	4	un	1339,19	5.356,76
Execução de caixa de retenção de areias em betão C35/45, classe de exposição XA3, armado com aço A400NR, incluindo cofragem, descofragem, juntas de betonagem sempre que necessário, pinturas e todos os trabalhos	4,75	m ³	211,52	1.004,72
Fornecimento para instalação nas caixas de retenção de areias de tampa em ferro fundido com proteção anticorrosiva da classe de carga D-400	4	un	81,78	327,12
Degraus regulamentares em aço revestidos a polipropileno	4	un	2,82	11,28
Execução e fornecimento de "cesto" para remoção de materiais flutuantes em material polimérico rígido e não oxidável Ø20, com perfuração retangular de 20 mm, incluindo todos os trabalhos	2	un	1259,26	2.518,52
Fornecimento e instalação de sistema de elevação do cesto				

de remoção de flotáveis em cabo de nylon de cor negra com 8,0 mm	20	m	3,77	75,40
Custo total do sistema de impermeabilização da célula de confinamento e lagoas da estação de tratamento de lixiviados				807.795,97
Custo total do sistema de drenagem de lixiviados				754.186,94
Custo total dos sistemas de proteção ambiental passivo e ativo (excluído o sistema de drenagem de águas pluviais e recolha e tratamento de biogás)				1.561.982,91

Através do disposto na tabela acima apresentada pode verificar-se que a utilização desta solução alternativa, garante uma poupança de cerca de 6900 €. A apesar de se tratar de um valor relativamente baixo, dado o nível de custo da infraestrutura, representa uma poupança significativa no contexto económico atual.

A solução proposta não apresenta vantagem só a nível financeiro, sendo notórios os melhoramentos também na fase construtiva e na fase de exploração da infraestrutura, nomeadamente através das funcionalidades inerentes aplicação do geocompósito drenante.

Assim sendo, a utilização de geocompósitos drenantes torna-se vantajoso, pois:

- Permitem um menor tempo de execução, quando comparado com as tradicionais camadas drenantes;
- Apresentam um custo inferior aos agregados naturais correntemente utilizados;
- Permitem um aumento da inclinação da área a drenar;
- São de fácil instalação, não requerendo mão-de-obra nem equipamentos muito sofisticados;
- Podem substituir parcial ou totalmente a camada drenante constituída por agregado natural;
- Apresenta valores altos para a transmissividade, mesmo sobre carregamento.

Para além das vantagens evidenciadas, a utilização de geocompósitos drenantes permite um aumento na capacidade de armazenamento. No caso em estudo, a implementação desta nova solução provocaria uma redução da espessura do sistema de impermeabilização em cerca de 0,30 m. A redução da espessura, como já referido, tem como consequência direta o aumento da capacidade de armazenamento sendo que, neste caso, a redução de 0,30 m provoca um aumento da capacidade de armazenamento em cerca de 16000 m³.

A utilização de soluções de drenagem com recurso a geocompósitos drenantes, devem ser definidas tendo em consideração as precauções necessárias para tal, quer na fase de projeto quer na fase de execução da camada.

Alguns problemas associados a estes tipos de soluções passam pela incorreta seleção do geocompósito a implementar. De fato, uma escolha errada pode levar à ocorrência de

exposição do geocompósito a condições desfavoráveis tais como cargas excessivas ou casos em que a sua capacidade drenante se manifeste insuficiente para o fluxo de lixiviado produzido. O ponto mais relevante é sem dúvida a definição valores mínimos de cargas compatíveis com a capacidade de suporte da georrede. A capacidade de suporte da georrede está diretamente relacionada com a capacidade drenante do geocompósito. Na maioria dos casos, esta capacidade drenante é suficiente para dar resposta ao fluxo de lixiviados e evitar uma altura elevada dos mesmos no interior do aterro. No entanto, deverão ser consideradas as condições de carregamento a longo prazo de forma a que a ocorrência de tensões elevadas não provoque uma diminuição da capacidade drenante para valores que possam comprometer o funcionamento do sistema de drenagem. A diminuição do fluxo drenante no plano da georrede ocorre, como já referido, pela ação de cargas de compressão, cargas estas que provocam a fluência da georrede e a inserção de material como partículas provenientes da camada drenante mineral e do próprio geotêxtil de proteção, provocando interrupções nos percursos de escoamento.

Os problemas associados a este tipo de soluções não passam apenas pela má definição das cargas a que serão sujeitos os geossintéticos, nem pela má escolha dos mesmos, prendem-se em muito, também, com a qualidade de concepção.

Na fase de construção, a concepção da camada drenante composta pelo geocompósito exige os cuidados referidos para os restantes geossintéticos, nomeadamente relativos ao armazenamento, colocação e soldadura.

4.8.1. Solução alternativa atendendo a alteração das características de perigosidade da massa de resíduos a admitir

Relativamente à solução implementada, propõe-se ainda uma solução ponderada, tendo em consideração uma alteração da massa de resíduos a admitir, passando esta a ser constituída por resíduos perigosos.

Assim sendo, apresenta-se na Figura 75 e Figura 76 as propostas para o sistema de impermeabilização e sistema de drenagem de lixiviados. Nesta solução, são consideradas duas camadas drenantes constituídas pela sobreposição de dois geocompósitos drenantes, compostos por georrede, protegida superior e inferiormente por geotêxtil não tecido. A primeira camada drenante surge em substituição, em termos de posicionamento, da camada de areia, e assegura a recolha de lixiviados, encaminhando-os para drenos de recolha que garantirão a drenagem dos mesmos. A camada drenante secundária permite a detecção de fugas através do sistema primário de recolha e impermeabilização, colmatando a falta de métodos de detecção de fugas como os já referidos. Esta barreira secundária,

atua como barreira de segurança, garantindo a drenagem de líquidos contaminados caso ocorra uma danificação do sistema primário, que permita a passagem de lixiviado através deste.

Os aspetos importantes nesta solução, passam pela garantia de funcionamento da georrede, nomeadamente relativamente à sua resistência e capacidade drenante, bem como pelo espaçamento entre drenos de recolha de forma a garantir a altura regulamentar de lixiviado no interior da célula.

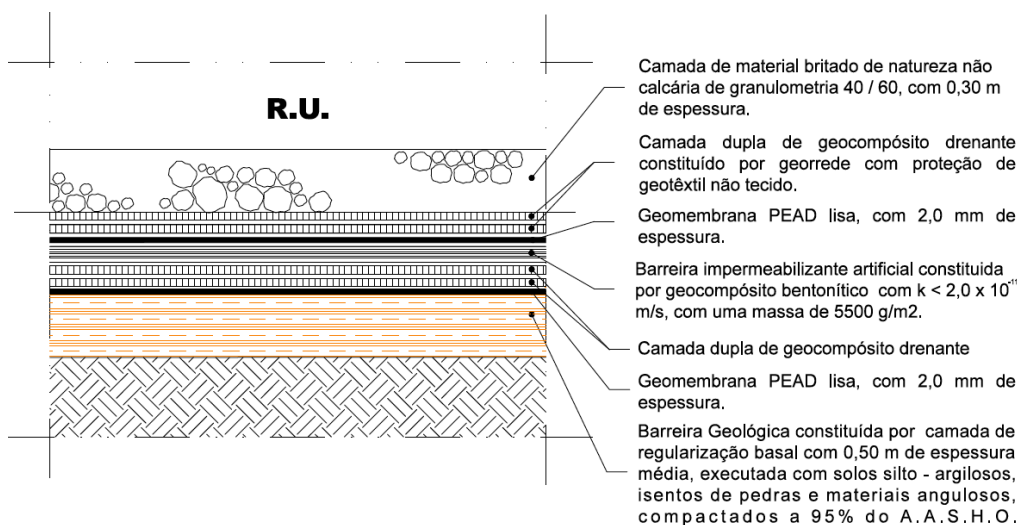


Figura 75-Esquema do sistema de impermeabilização e drenagem de lixiviados alternativo.

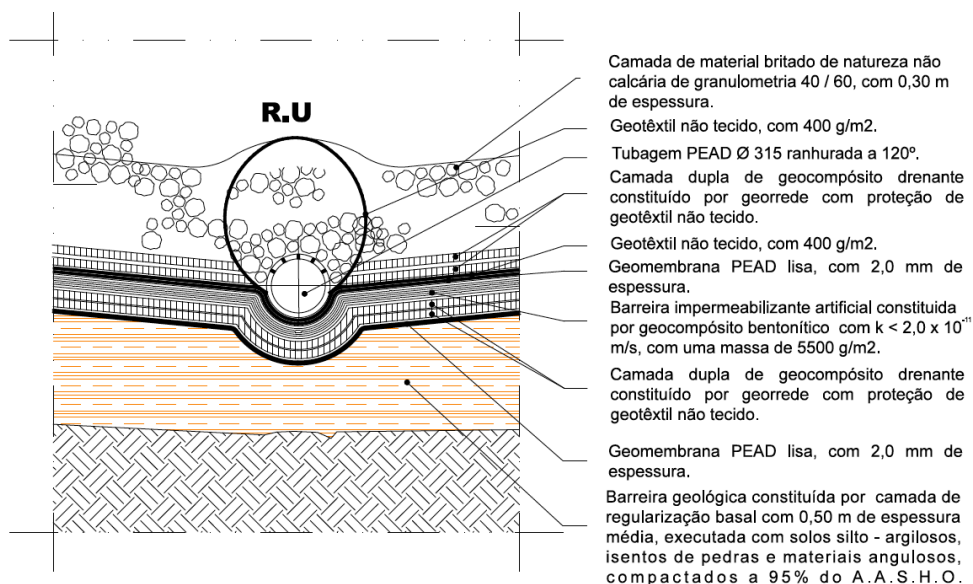


Figura 76 – Pormenor do dreno de recolha de lixiviados do sistema alternativo.

Posto isto, procede-se à determinação do espaçamento entre os drenos de recolha, sendo este procedimento realizado de forma similar ao definido em projeto.

Determinação do $K_{\text{equivalente}}$.

$$K_{\text{equivalente}} = \frac{\sum k_i \times d_i}{\sum d_i}$$

Onde,

$$k_{\text{brita}} - 1,0 \times 10^{-1} \text{ m/s}$$

$$d_{\text{brita}} - 0,30 \text{ m}$$

$$k_{\text{geocompósito}} - 3,0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$d_{\text{geocompósito}} - 0,015 \text{ m}$$

A utilização da fórmula com os valores apresentados, leva à determinação de um $K_{\text{equivalente}} = 0,11 \text{ m/s}$.

A determinação do espaçamento entre drenos é feita com recurso à formula proposta por Richardson and Koerner (1987):

$$hc = \frac{D \times \sqrt{S}}{2} \left[\frac{\tan^2 \alpha}{S} + 1 - \frac{\tan \alpha}{S} \sqrt{\tan^2 \alpha + S} \right]$$

A utilização desta fórmula pressupõe a determinação de S , sendo este o cociente entre o caudal máximo a drenar ($1,17 \times 10^{-6} \text{ m/s}$) pelo coeficiente de permeabilidade equivalente ($k=0,11 \text{ m/s}$). Deste cociente resulta um $S=1,06 \times 10^{-5}$. Relativamente à altura máxima de lixiviado entre drenos, considera-se o valor também definido em projeto (0,05 m), acontecendo o mesmo com a inclinação dos drenos na zona basal (2%).

Com a aplicação na fórmula, dos valores referidos, obtém-se um $D=60 \text{ m}$. Assim sendo, a configuração do sistema de drenagem pode seguir a configuração do sistema definido na Figura 74.

A proposta desta solução pressupõe também a realização de uma análise de custos. Posto isto, apresentam-se na tabela seguinte as quantidades de material a utilizar na concepção do sistema de impermeabilização e drenagem de lixiviados, bem como os custos inerentes ao fornecimento e aplicação dos mesmos (preços atualizados pela empresa dst,s.a em de 2014).

Tabela 29 - Custos associados à execução da solução proposta

Descrição	Quantidade	Un.	C. unitário (€)	C. total (€)
Sistema de Impermeabilização - Barreira Passiva e Barreira Ativa				
Impermeabilização da zona basal e taludes da célula de confinamento, incluindo desperdícios, soldaduras, verificação da conformidade das soldaduras, amarrações e sobreposições e todos os				

trabalhos, constituída por:				
Barreira Passiva				
Execução da camada de regularização basal com 0,50 m de espessura média, com solos resultantes da escavação, isento de pedras ou materiais angulosos, incluindo regularização e compactação dos mesmos até 95% do A.A.S.H.O, em camadas que não ultrapassem 0,20 m de espessura	51222	m ³	1,55	79.394,10
Fornecimento e colocação de geocompósito bentonítico, com 5500g/m ²	102444	m ²	2,77	283.769,88
Barreira Ativa				
Fornecimento e colocação de geomembrana lisa de PEAD, com 2,0 mm de espessura	162494	m ²	3,36	549.339,84
Fornecimento e colocação de geotêxtil não tecido 400 g/m ² , com função de proteção mecânica na zona dos drenos de recolha.	11001,65	m ²	1,02	11.221,68
Fornecimento e aplicação de geocompósito drenante constituído por georrede protegida com geotêxtil não tecido com 400g/m ²	222132	m ³	3,29	730.814,28
Camada de brita de natureza não calcária ou de rochas provenientes da escavação, de natureza não calcária, de granulometria 40/60 com 0,30 m de espessura	16661	m ³	18,72	311.894,00
Fornecimento e assentamento de lajetas de betão simples na cor natural, autoblocantes tipo (UNI), incluindo todos os trabalhos	25	m ²	7,22	180,50
Execução das valas de amarração dos geossintéticos, incluindo todos os trabalhos necessários:				
Amarração dos geossintéticos nas valas a executar nas banquetas:				
Escavação para abertura de vala com 0,50 x 0,50 (largura x profundidade), em solo de qualquer natureza	2554	ml	1,05	2.681,70
Aterro da vala de amarração com solos provenientes da escavação, isentos de pedras e materiais angulosos	639	m ³	2,53	1.616,67
Fornecimento e colocação de geotêxtil não tecido 300 g/m ² , com função de proteção mecânica	5517	m ²	0,70	3.861,90
Amarração dos geossintéticos na vala de crista de talude:				
Escavação para abertura de vala com 0,80 x 1,00 (largura x profundidade), em solo de qualquer natureza	1414	ml	3,36	4.751,04
Aterro da vala de amarração com solos provenientes da escavação, isentos de pedras e materiais angulosos	1131	m ³	2,53	2.861,43

Fornecimento e colocação de geomembrana lisa de PEAD, com 2,0 mm de espessura	4495	m ²	3,36	15.103,20
Fornecimento e colocação de geocompósito bentonítico com 5500g/m2	4495	m ²	2,77	12.451,20
LAGOAS DE REGULARIZAÇÃO				
Lagoa de regularização de lixiviados				
Impermeabilização da lagoa, incluindo desperdícios, soldaduras, amarrações e sobreposições, constituída por:				
Execução da camada de regularização basal com 0,50 m de espessura média, com solos resultantes da escavação, isento de pedras ou materiais angulosos, incluindo regularização e compactação dos mesmos até 95% do A.A.S.H.O, em camadas que não ultrapassem 0,20 m de espessura	1851,5	m ³	2,28	4.221,42
Fornecimento e colocação de geocompósito bentonítico, com 5500 g/m2	4035	m ²	2,77	11.177,00
Fornecimento e colocação de geomembrana lisa de PEAD, com 2,0 mm de espessura	4035	m ²	3,36	13.557,60
Fornecimento e execução de amarração dos geossintéticos no dique periférico da lagoa, conforme desenho de pormenor, incluindo todos os trabalhos necessários:				
Escavação para abertura de vala com (1,00 x 0,80 m), em solo de qualquer natureza	231	ml	3,36	776,16
Aterro da vala de amarração com solos selecionados, isentos de pedras e materiais angulosos, incluindo todos os trabalhos	184,1	m ³	2,53	465,77
Lagoa de regularização de efluente tratado				
Impermeabilização da lagoa, incluindo desperdícios, soldaduras, amarrações e sobreposições, constituída por:				
Execução da camada de regularização basal com 0,50 m de espessura média, com solos resultantes da escavação, isento de pedras ou materiais angulosos, incluindo regularização e compactação dos mesmos até 95% do A.A.S.H.O, em camadas que não ultrapassem 0,20 m de espessura	851,5	m ³	1,55	1.319,83
Fornecimento e colocação de geocompósito bentonítico, com 5500 g/m2	1730	m ²	2,77	4.792,10
Fornecimento e colocação de geomembrana lisa de PEAD, com 2,0 mm de espessura	1730	m ²	3,36	5.812,80

Fornecimento e execução de amarração dos geossintéticos no dique periférico da lagoa, incluindo todos os trabalhos necessários:				
Escavação para abertura de vala com (1,00 x 0,80 m), em solo de qualquer natureza	144	ml	3,36	483,84
Aterro da vala de amarração com solos selecionados, isentos de pedras e materiais angulosos, incluindo todos os trabalhos	115,2	m ³	2,53	291,45
Lagoa de tempestade				
Impermeabilização da área basal da lagoa, incluindo desperdícios, soldaduras, amarrações e sobreposições, constituída por:				
Fornecimento e colocação de geomembrana lisa de PEAD, com 2,0 mm de espessura	1990	m ²	3,36	6.686,40
Fornecimento e execução de amarração dos geossintéticos no dique periférico da lagoa, incluindo todos os trabalhos necessários:				
Escavação para abertura de vala com (1,00 x 0,80 m), em solo de qualquer natureza	144	ml	3,36	483,84
Aterro da vala de amarração com solos selecionados, isentos de pedras e materiais angulosos, incluindo todos os trabalhos	115,2	m ³	2,53	291,45
Execução da rede de drenagem de lixiviados, incluindo fornecimento e assentamento de tubagens e acessórios, soldaduras e desperdícios				
Fornecimento e assentamento de tubagem em PEAD, PN10, no interior da zona de confinamento, incluindo abertura e fecho de vala, em conformidade com as especificações do caderno de encargos				
Ø315, ranhurada a 120°	909	ml	39,10	35.541,90
Ø315, cega	1322	ml	25,44	33.631,68
Execução de impermeabilização nos atravessamentos de telas, incluindo escavação e aterro para execução dos trabalhos, soldadura a cordão e todos os trabalhos necessários, para tubagem em PEAD, PN10, Ø315.	25	un	139,50	3.487,50
Fornecimento e assentamento de tubagem em PEAD, PN10, no exterior da zona de confinamento, incluindo abertura e fecho de vala, em conformidade com as especificações do caderno de encargos				
Ø315	750	ml	25,44	19.080,00

Ø450	95	ml	91,21	8.664,95
Ø560	70	ml	150,35	10.524,50
Fornecimento e instalação de caixas de visita em PEAD, Ø1000, incluindo tampa em ferro fundido, escavação a uma altura não superior a 2,50 m, em conformidade com as especificações do caderno de encargos	11	un	1241,07	13.651,80
Fornecimento e instalação de caixas de visita em PEAD, Ø1000, incluindo tampa em ferro fundido, escavação a uma altura não superior a 6,00 m, em conformidade com as especificações do caderno de encargos	12	un	2034,61	24.415,30
Fornecimento e instalação de caixas de visita executadas em anéis de betão simples, Ø1000, incluindo tampa em ferro fundido, escavação a uma altura não superior a 6,00 m, em conformidade com as especificações do caderno de encargos	1	un	806,03	806,03
Execução de caixas para instalação de válvula de cunha elástica, incluindo todos os fornecimentos, instalações e acessórios:				
Escavação para implantação de caixa em solo de qualquer natureza	24	ml	2,28	54,72
Fornecimento e execução de caixa em tubos de betão armado Ø1600, incluindo vedantes e todos os trabalhos	6	un	677,32	4.063,92
Execução de laje (3,0mx3,0m) em betão C20/25 armado com aço A400NR, incluindo cofragem, descofragem, juntas de betonagem sempre que necessário, pinturas e todos os trabalhos	10,8	m ³	117,67	1.270,84
Fornecimento e instalação de tampas em PRV	6	un	324,24	1.945,44
Válvula de cunha elástica Ø300, PN10, em ferro fundido dúctil com revestimento epóxico, cunha revestida a NBR, vedantes substituíveis em carga e fuso em aço inox AISI 316 L, adequada a águas residuais, incluindo apoio	6	un	1064,72	6.388,32
Fornecimento e instalação de conjunto de manobra telescópico para válvula Ø300, completo, incluindo, noz, dado, volante e braço até uma altura de 10 cm da tampa da caixa	6	un	1295,46	7.772,76
Degraus regulamentares em aço revestidos a polipropileno	36	un	2,82	101,52
Fornecimento e instalação de válvula mural Ø350 em caixa de visita PEAD, com revestimento epóxico, obturador redondo e fuso em aço inox AISI 316 L	4	un	1339,19	5.356,76
Execução de caixa de retenção de areias em betão C35/45, classe de exposição XA3, armado com aço A400NR, incluindo cofragem, descofragem, juntas de betonagem	4,75	m ³	211,52	1.004,72

sempre que necessário, pinturas e todos os trabalhos				
Fornecimento para instalação nas caixas de retenção de areias de tampa em ferro fundido com proteção anticorrosiva da classe de carga D-400	4	un	81,78	327,12
Degraus regulamentares em aço revestidos a polipropileno	4	un	2,82	11,28
Execução e fornecimento de "cesto" para remoção de materiais flotáveis em material polimérico rígido e não oxidável Ø20, com perfuração retangular de 20 mm, incluindo todos os trabalhos	2	un	1259,26	2.518,52
Fornecimento e instalação de sistema de elevação do cesto de remoção de flotáveis em cabo de nylon de cor negra com 8,0 mm	20	m	3,77	75,40
Custo total do sistema de impermeabilização da célula de confinamento e lagoas da estação de tratamento de lixiviados				1.017.412,30
Custo total do sistema de drenagem de lixiviados				1.223.583,76
Custo total dos sistemas de proteção ambiental passivo e ativo (excluído o sistema de drenagem de águas pluviais e recolha e tratamento de biogás)				2.240.996,06

De forma conclusiva, pode referir-se que a implementação desta solução, considerada apenas para a eventualidade de uma alteração da constituição da massa de resíduos admitida, apresenta custos consideravelmente superiores relativamente ao sistema implementado, na ordem dos 670.000 €. Contudo, demonstra-se ser a solução mais indicada para aterros que admitem resíduos perigosos.

5. Conclusões

A produção de resíduos é um fato inevitável na sociedade em que vivemos. Esta tem sofrido uma grande evolução quer quantitativa quer qualitativamente, levando à necessidade de implementação de medidas de controlo e minimização aliadas à criação de entidades e infraestruturas que garantam o correto tratamento e valorização dos resíduos, garantindo os requisitos ambientais e de saúde pública.

De forma conclusiva, a análise realizada ao setor dos resíduos em Portugal permitiu verificar a evolução de que este tem sido alvo, encontrando-se hoje organizado de forma integrada, garantindo o desenvolvimento sustentável dos serviços relativos aos resíduos. Um fato importante nesta evolução do setor é a visão que para este se tem a longo prazo, materializada através da implementação de planos estratégicos, aliados à definição de um enquadramento institucional, legislativo e normativo, que permite regulamentação da atividade, a definição de responsabilidade e estabelecimento de requisitos para a implementação de infraestruturas de tratamento de resíduos.

Embora a reorganização do setor tenha provocado uma reorganização territorial, que promoveu a evolução de um nível local para um nível regional, e a criação de um vasto património de infraestruturas, são ainda necessárias algumas modificações. O PERSU 2020, surge de forma a implementar essas modificações. No entanto, através da análise da proposta do plano, são verificadas algumas falhas que, como já mencionadas no decorrer do presente trabalho, foram identificadas.

A implementação de medidas de gestão de resíduos acarreta benefícios não só a nível ambiental, mas também a nível económico para o país. O impacto económico relativo às atividades de gestão de resíduos tem vindo a acentuar-se nos últimos anos, sendo que a melhoria contínua destas atividades potenciará o crescimento da riqueza e a criação emprego.

Embora se promovam ações para a minimização da produção de resíduos, e minimização da sua deposição direta em aterro, este tipo de infraestruturas, embora se verifique em menor número, será sempre uma necessidade para fazer face aos produtos resultantes dos processos de valorização de resíduos.

A deposição de resíduos de forma controlada, sem riscos acrescidos para o ambiente, é garantida em aterros de resíduos pelas exigências de impermeabilização e controlo estabelecidas na legislação em vigor. Estas exigências são conseguidas neste tipo de infraestrutura essencialmente com recurso a aplicação de geossintéticos.

Atualmente, e como consequência de uma evolução quer de materiais quer de processos de produção, é possível encontrar-se no mercado uma enorme variedade de geossintéticos

capazes de garantir as necessidades de projeto e conferir maior qualidade e segurança na construção de aterros de resíduos. Estes surgem em detrimento de soluções tidas como tradicionais, apresentando uma maior versatilidade, podendo desempenhar múltiplas funções, tais como impermeabilização, reforço, proteção e drenagem, entre outras.

Em aterros de resíduos, a utilização de geossintéticos prende-se essencialmente com a utilização de geotêxteis, georredes e geocompósitos drenantes, geomembranas, e geocompósitos bentoníticos.

A introdução de geotêxteis neste tipo de obra promoveu uma melhoria da sua segurança, nomeadamente através da capacidade de reforço da estabilidade de solos. No entanto, estes desempenham também funções de separação, drenagem e proteção, assumindo esta última elevada importância, nomeadamente na proteção da geomembrana.

As georredes promoveram uma melhoria na estabilização dos solos em taludes, contribuindo para uma minimização da movimentação de solos e proporcionando a possibilidade de construção de taludes com maiores inclinações. A implementação de georredes ou geocompósitos drenantes em sistema de drenagem, devem ser ponto de consideração, dado ao melhoramento que introduzem na condução de águas pluviais, lixiviados e biogás, através de um aumento no caudal drenado, permitindo também melhorias na estabilidade, o que contribui, mais uma vez, para a melhoria da segurança, nomeadamente no que se refere à minimização de impactos ambientais.

Os geocompósitos bentoníticos associados a aterros de resíduos, com as características mencionadas durante a elaboração do presente trabalho, surgem em substituição das tradicionais barreiras de argila compactada, incrementando uma melhoria, mais uma vez, na segurança, nomeadamente aquela associada à geomembrana, dada à capacidade de resistência ao punçoamento que esta possui, diminuindo assim as deformações sob esta.

As geomembranas serão possivelmente, o geossintético que maior importância possui em aterros de resíduos. A utilização de geomembranas incrementa uma segurança ambiental a este tipo de infraestrutura que não é possível verificar com outro tipo de material. Estas assumem funções de barreira, impedindo a fuga de líquidos ou gases para o meio envolvente, diminuindo os impactos ambientais associados a este tipo de processo de gestão de resíduos.

Pode, então, concluir-se que os geossintéticos utilizados em aterros de resíduos promovem melhorias na segurança, quer a nível da estabilidade da infraestrutura quer a nível ambiental, reduzindo os impactos associados à deposição de resíduos. Torna-se vantajosa a utilização deste tipo de materiais, dada a sua facilidade de aplicação, fiabilidade e custo consideravelmente reduzido, comparativamente às soluções tradicionalmente aplicadas.

É de referir, também, que a constante evolução destes materiais tem vindo a reduzir a espessura do sistema de impermeabilização e drenagem de lixiviados, o que permite um maior volume de encaixe.

A análise feita ao sistema de drenagem permite concluir haver necessidade da implementação de novas soluções para este tipo de sistemas, nomeadamente através da aplicação geocompósitos drenantes que maximizam o fluxo drenado, permitindo minimização a altura de lixiviados presente no interior do aterro. Este tipo de soluções para além de se tornarem mais fiáveis que as tradicionalmente utilizadas, permitem ainda a realização do sistema de drenagem com custos mais reduzidos.

A fase de estágio permitiu perceber a complexidade inerente à construção deste tipo de infraestruturas e à constatação de incompatibilidades entre o projeto e a implementação em obra. As incompatibilidades verificadas prendem-se, essencialmente, com a utilização de materiais diferentes dos especificados e com cruzamento e sobreposição infraestruturas, tornando-se impossível a execução das mesmas como descrito.

Outra preocupação verificada em obra, foi a garantia da qualidade de construção, nomeadamente do sistema de drenagem de lixiviados, sendo que, em alguns casos, não foram utilizados os materiais devidos, nomeadamente nas caixas de visita e no acondicionamento da tubagem, sendo esta exposta durante meses às condições climáticas e ações mecânicas.

Posto isto, e embora não tenha sido acompanhada a construção do sistema de proteção ambiental, torna-se preocupante a forma como serão acondicionados e posteriormente manuseados os geossintéticos que dele fazem parte. Recomenda-se, pois, que sejam seguidos os procedimentos definidos no presente trabalho, descritos também no Plano de Garantia de Qualidade da Instalação dos Geossintéticos elaborado pelo LNEC.

Referências bibliográficas

- Duarte , A. F. (2009). *Aplicação de Geossintéticos na Impermeabilização e Selagem de Aterros*. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro.
- APA. (2014). *Relatório Anual Resíduos Urbanos - Parte II*. Agência Portuguesa do Ambiente.
- APA. (2014). *Relatório Anual Resíduos Urbanos 2012 - Parte I*. Agência Portuguesa do Ambiente.
- Barroso, M., & Lopes, M. (2008). *Plano de Garantia de Qualidade da Instalação dos Geossintéticos (Plano de GQIG) em Aterros de Resíduos* (1st ed.). Lisboa: LNEC.
- Cadwallader, M. (2 de março de 2012). *Daily Cover Challenges and Solutions at Puente Hills Landfill*. (E. E. Inc., Ed.) Obtido em 9 de maio de 2014, de Enviro Cover System: http://www.envirocoversystem.com/pdf/case_study_daily_cover_challenges_and_solutions_at_puente_hills_landfill.pdf
- Carneiro, J. d. (2009). *Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental - a importância de aditivos químicos*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Carreira, L., & Cabeças, A. (2002). *Resíduos Sólidos Urbanos. Concepção, construção e exploração de tecnossistemas*. Instituto dos Resíduos .
- EC. (21 de dezembro de 2005). *European Commission*. Obtido em 24 de fevereiro de 2014, de The Story Behind the Strategy: EU Waste Policy: http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/story_book.pdf
- EEA. (2013). *Managing municipal solid waste - a review of achievements in 32 European countries* . Luxembourg : European Union .
- EEA. (2013). *Municipal waste management in Germany*. Copenhagen : European Environmental Agency .
- ENGEPOL. (s.d.). *ENGEPOL*. Obtido em 15 de maio de 2014, de <http://www.engepol.com/resources/pdf/catalogo/manual-geossinteticos-engepol.pdf>
- EPA. (2014). *Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States Tables and Figures for 2012* .
- Eptisa led Consortium. (2010). *Landfill Operations Guidance Manual*.
- Eurostat. (2012). *Europe in figures: Eurostat yearbook 2012*. Luxembourg:: European Union.
- Eurostat. (2013). *Key figures on Europe: 2013 digest of the online Eurostat yearbook*. Luxembourg: European Union.

- Fernandes, L. d. (2006). *O processo decisório da localização de um aterro de RSU: o caso de Sermonde*. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro.
- Figueiredo, V. M. (2013). *ATERRO DE SANTO TIRSO: ANÁLISE DAS METODOLOGIAS DE GESTÃO E PROPOSTAS DE AÇÃO*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Fluet, J. E. (1998). Geosynthetics for soil improvement: a general report and keynote address. *Proceedings of the Symposium on Geosynthetics for Soil Improvement*, (pp. 1-21). Tennessee.
- France, R. (2008). *Handbook of Regenerative Landscape Design*. Cambridge, Massachusetts, USA: CRC Press.
- Franchetti, M. (2009). *Solid Waste Analysis and Minimization: A Systems Approach: The Systems Approach*. McGraw-Hill Professional.
- Geosynthetics, F. (2012). United Kingdom.
- Hawkins, R. G., & Shaw, H. (2004). *The practical guide to waste management law with a list of abbreviations and acronyms, useful websites and relevant legislation*. London: London Thomas Telford.
- Hempfen, S. (2005). Status and Trends of the Residual Waste Treatment Options in Germany. *Conference "The future of residual waste management in Europe*.
- Hickman, M. (3 de dezembro de 2013). *Mother Nature Network*. Obtido em 13 de março de 2014, de <http://www.mnn.com/earth-matters/energy/blogs/nycs-largest-solar-facility-coming-to-former-staten-island-dump>
- Koerner, R. M. (2005). *Designing with Geosynthetics* (5ª Edição ed.). New Jersey: Pearson Education, Inc.
- LaGrega, M. D., Buckingham, P. L., & Evans, J. C. (2001). *Hazardous Waste Management*. Singapore: McGraw-Hill.
- Levy, J., & Cabeças, A. (2006). *Resíduos Sólidos Urbanos – Princípios e Processos*. AEPSA – Associação das Empresas Portuguesas para o Sector do Ambiente.
- Lopes, M. A., & Conde, M. (novembro de 2008). O aterro sanitário como bio-reactor: desafios geotécnicos. *Geotecnia n°114*, 47-70.
- Lopes, M. P., & Lopes, M. d. (2010). *A Durabilidade dos Geossintéticos* (1.ª edição ed.). Porto: FUEP edições.
- Müller, W. W. (2007). *HDPE Geomembranes in Geotechnics*. Springer.
- MAOTDR. (2007). *PERSU II- Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos*. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.

- MAOTE. (2013). *PERSU 2020 Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos*. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia.
- MAOTE. (2013). *PERSU 2020- Plano Estratégico para Resíduos Urbanos*. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia.
- Martinho, M. G., & Gonçalves, M. G. (2000). *Gestão de Resíduos*. Edição Universidade Aberta.
- Martins, F. J. (2007). *Apontamentos de Hidráulica Aplica I*. Viseu: Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu.
- Matos Fernandes, M. (2008). *Mecânica dos Solos - Conceitos e Princípios Fundamentais* (Vol. I). Porto: FEUP edições.
- McBean, E. A., Rovers, F. A., & Farquhar, G. J. (1995). *Solid Waste Landfill Engineering and Design*. New Jersey, USA: Prentice Hall PTR, Prentice Hall Inc.
- McDougall, F., White, P., Franke, M., & Hindle, P. (2001). *Integrated Solid Waste Management: a Life Cycle Inventory* (2ª Edição ed.). Blackwell Science.
- Melosi, M. (2004). *Garbage In The Cities: Refuse Reform and the Environment*. University of Pittsburgh Press.
- Melosi, M. V. (2002). The Fresno Sanitary Landfill in an American Cultural Context. *The Public Historian* , 24, 15-35.
- Neoplastic.
- Neves, L. P. (2003). *Geossintéticos e Geossistemas em Engenharia Costeira*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Neves, L., Lopes, M. L., Gomes, F. V., & Pinto, F. T. (2009). Experimental Stability Analysis of Geotextile Sand-filled Containers for Dune Erosion Control. *Journal of Coastal Research* (SI 56), 487-490.
- Nordgrén, M., Goldstein, E., & Izeman, M. (2002). *THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF THE WORLD TRADE CENTER ATTACKS*. Natural Resources Defense Council.
- Oliveira, M. A. (2001). *Geocompósitos bentoníticos - Análise de alguns aspetos so seu comportamento mecânico*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto: FEUP.
- Piedade, M., & Aguiar, P. (2010). *Opções de Gestão de Resíduos Urbanos*. Lisboa: Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos.
- Rathje, W., & Murphy, C. (1992). *Rubbish! THE Archaeology of Garbage*. New York: Harper Collins Publishers.
- Rhyner, C. R., Schwartz, L. J., Wenger, R. B., & Kohrell, M. G. (1990). *Waste Management and Resource Recovery*.

- Russo, M. A. (2006). *Avaliação dos processos de transformação de resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário*. Tese de Douturamento, Universidade do Minho.
- Russo, M. (2003). *Tratamento de Resíduos Sólidos*. Coimbra: Universidade de Coimbra.
- Sá Marques, J. A., & Sousa, J. d. (2011). *Hidráulica Urbana - Sistemas de Abastecimento de Água e de Drenagem de Águas Residuais* (3.^a Edição ed.). Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra.
- Shah, K. L. (2000). *Basics of Solid and Hazardous Waste Management Technology*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Shukla, S. K. (2002). *Geosynthetics and their applications* (1st ed.). (S. K. Shukla, Ed.) Thomas Telford Publishing.
- Tchobanoglous, G., Theison, H., & Vigil, S. (1993). *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*. New York: McGraw-Hill Companies.
- Theisen, M. S. (1992). The Role of Geosynthetics in Erosion and Sediment Control: An Overview. *Geotextiles and Geomembranes* , 535-550.
- UNEP. (2011). *BASEL CONVENTION: ON THE CONTROL OF TRANSBOUNDARY MOVEMENTS OF HAZARDOUS WASTES AND THEIR DISPOSAL*. Geneva: United Nations Environment Programme.
- Vieira, F. N. (2013). *Articulação do tratamento das águas lixiviantes de infra-estruturas de resíduos com ETAR Urbanas - Caso de estudo*. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Ward, E. (14 de Julho de 2011). Obtido em 26 de Fevereiro de 2014, de Green Risks: <http://greenrisks.blogspot.pt/2011/07/landfills-history.html>
- Watch, W. (2004). *History of waste and recycling information sheet*. Obtido em 2 de Março de 2014, de <http://www.wasteonline.org.uk/resources/InformationSheets/HistoryofWaste.pdf>
- Weissenbach , T. (2008). *Evaluation of waste policies related to the Landfill Directive*. Copenhagen : European Topic Centre on Resource and Waste Management .
- Williams, P. T. (2005). *Waste Treatment and Disposal*. England: John Wiley & Sons Ltd.
- Yin, J.-H., & Shukla, S. K. (2006). *Fundamentals of Geosynthetic Engineering*. Taylor & Francis.

Anexos

Anexo A – Princípios e conceitos básicos relacionados com aterros

Anexo B – Materiais tubagem

Anexo C – Monitorização de águas subterrâneas

Anexo D – Exemplos de características técnicas dos geossintéticos utilizados

Anexo E – Boletim de ensaios realizado ao solo a utilizar na camada de regularização

Anexo F – Localização do ponto de recolha da amostra de solo

Anexo A – Princípios e conceitos básicos relacionados com aterros

Um aterro sanitário não é mais do que um local destinado à eliminação de resíduos recorrendo à sua deposição acima ou abaixo da superfície, recorrendo a técnicas adequadas, de forma a serem evitados a degradação do meio ambiente e saúde pública, sendo estes os aspetos mais importante para a fase de exploração, encerramento e pós-encerramento da infraestrutura (Piedade & Aguiar, 2010).

O aterro sanitário funciona como um sistema tratamento de resíduos, onde existem entradas e saídas. Como entradas podemos considerar os RSU a depositar e a energia necessária para o processo. Sendo considerado um aterro um sistema de tratamento, o processo por trás desse sistema é, então, a decomposição dos resíduos depositados. Finalizado o processo tem-se, então, as saídas, que são os resíduos estabilizados, os lixiviados produzidos e o biogás (McDougall, White, Franke, & Hindle, 2001).

Para o seu correto funcionamento é necessário que a construção, exploração, encerramento, e pós-encerramento deste tipo de infraestruturas cumpram uma série de requisitos.

A.1. Localização

A localização de um aterro sanitário é um dos fatores mais importantes a ter em consideração aquando do seu projeto, construção, exploração e encerramento. Porém, esta revela-se uma missão bastante complexa. A escolha do local baseia-se numa análise dos fatores socioeconómicos e ambientais. Como fatores socioeconómicos podem ser compreendidos as acessibilidades ao local, a proximidade a zonas urbanas, a distância às fontes produtoras de resíduos, o impacto provocado pelo tráfego e pelo ruído, o impacto paisagístico e a preservação de valores sociais, culturais e económicos. Da mesma forma, compreende-se como fatores ambientais, as características geológicas e hidrogeológicas do local, as condições hidrológicas e sismográficas, a geomorfologia, clima e meteorologia, ecossistemas e ocupação do solo (Piedade & Aguiar, 2010) / (LaGrega, Buckingham, & Evans, 2001).

O Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de agosto define, através do seu anexo I, que alguns requisitos que deverão ser considerados na escolha da localização de infraestruturas deste tipo, são:

- “A distancia do perímetro do local relativamente as áreas residenciais e recreativas, cursos de água, massas de água e outras zonas agrícolas e urbanas”;
- “A existência na zona de águas subterrâneas ou costeiras, ou de áreas protegidas”;

- “Condições geológicas e hidrogeológicas locais e da zona envolvente”;
- “Os riscos de cheias, de aluimento, de desabamento de terra ou de avalanches na zona”;
- “A proteção do património natural e cultural da zona”.

Segundo (Russo M. , 2003) existem ainda outras abordagens para a escolha da localização de aterros sanitários, recorrendo a estratégias que se baseiam na definição de uma zona de estudo que tem em foco a produção de resíduos e a distância de transporte para a deposição dos mesmos, ou a estratégias que se focam nas características do local, dando preferência a regiões conhecidas e com características desejáveis.

A.2. Controlo de emissões e proteção do solo e das águas

Na construção de um aterro deverão ser garantidas todas as condições para que, na fase de exploração, se evitem a poluição do ar, solo e águas, quer superficiais ou subterrâneas. Para tal estes devem ser dotados de sistemas de proteção ambiental e um sistema de selagem. A Tabela A.1 impõe os requisitos mínimos em função da classe de aterro.

Tabela A.1- Requisitos mínimos para aterros, referentes a controlo de emissões e proteção do solo e águas.

Classe do aterro	Aterro para resíduos inertes	Aterro para resíduos não perigosos	Aterro para resíduos perigosos
Sistema de proteção ambiental passivo:			
Barreira de segurança passiva.....	Sim	Sim	Sim
Sistema de proteção ambiental ativo:			
Barreira da impermeabilização artificial.....		Sim	Sim
Sistema de drenagem de águas pluviais.....		Sim	Sim
Sistema de drenagem e recolha de lixiviados.....		Sim	Sim
Sistema de drenagem e tratamento de biogás		(*)	(*)
Sistema de selagem final:			
Camada de drenagem de gases.....		(*)	(*)
Barreira de impermeabilização artificial.....			Sim
Camada mineral impermeável.....		Sim	Sim
Camada de drenagem >0,5m.....		Sim	Sim
Cobertura final com material terroso >1m.....	Sim	Sim	sim
Instalações e infraestruturas de apoio:			
Vedação.....	Sim	Sim	Sim
Portão.....	Sim	Sim	Sim
Vias de circulação.....	Sim	Sim	Sim
Queimador de biogás.....		(*)	(*)

(*) A definir em função do tipo de resíduos admitidos no aterro Decreto-Lei 183/2009 de 10 de agosto

A.2.1. Sistema de proteção ambiental

O sistema de proteção ambiental pode ser dividido em dois tipos: o sistema de proteção ambiental passivo e o sistema de proteção ambiental ativo.

A.2.1.1. Sistema de proteção ambiental passivo

Este tipo de sistema é constituído por uma camada de solo subjacente ao aterro, de forma a compor uma barreira de segurança passiva durante a fase de exploração do aterro e até à estabilização dos resíduos. A finalidade da construção desta barreira é a prevenção da contaminação dos solos e águas, pelos resíduos e seus lixiviados. O correto funcionamento desta barreira é assegurado pela sua composição, sendo constituída por uma formação geológica de baixa permeabilidade e de espessura adequada. A formação geológica é condicionada pelas condições geológicas e hidrogeológicas subjacentes e adjacentes ao local da construção do aterro, das quais resulte um efeito atenuador suficiente para impedir qualquer risco para o solo e águas subterrâneas, quer pela base quer pelos taludes. As faces expostas “diretamente” aos resíduos e seus lixiviados devem ser constituídas por uma camada mineral natural, de forma a garantirem as condições de condutibilidade hidráulica e espessura como definido na Tabela A.2, permitindo salvaguardar os requisitos ambientais em termos de proteção de solos e águas subterrâneas.

Tabela A.2- Requisitos para camada mineral

Classes de aterro	Aterro para resíduos inertes	Aterro para resíduos não perigosos	Aterro para resíduos perigosos
Coefficiente de permeabilidade (K, m/s).....	$\leq 1 \times 10^{-7}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$
Espessura (m).....	≥ 1 m	≥ 1 m	≥ 5 m

Fonte: DL n.º183/2009 de 10 de agosto

Esta barreira pode ser complementada ou reforçada artificialmente com outros materiais, no caso de a barreira geológica não apresentar as condições ideais para o efeito, tendo no entanto estes de garantir uma proteção equivalente, não podendo esta ter uma espessura inferior a 0,5m. Normalmente nestes casos, é utilizada uma camada de argila bentonítica envolvida em geotêxtil, vulgarmente conhecido como geocompósito bentonítico.

A.2.1.2. Sistema de proteção ambiental ativo

Os aterros destinados a receber resíduos não perigosos e os aterros destinados a receber resíduos perigosos devem possuir, para além de um sistema de proteção ambiental passiva, um sistema de proteção ambiental ativa. Este sistema é constituído por:

- Uma barreira de impermeabilização;

- Sistema de drenagem de águas pluviais, sendo este separativo na base do aterro e unitário na zona envolvente;
- Sistema de captação, drenagem e recolha de lixiviados;
- Sistema de captação, drenagem e tratamento de biogás.

Este tipo de sistema tem como principais objetivos:

- Controlar a infiltração de águas precipitadas, na base e nos taludes da zona de confinamento
- Evitar a infiltração de águas superficiais e subterrâneas nos resíduos depositados.
- Captar águas contaminadas e lixiviados, e permitir o seu escoamento para o sistema de tratamento dos mesmos;
- Captar, tratar e se possível, valorizar o biogás produzido.

O sistema de impermeabilização com barreira ativa é normalmente composto por geossintéticos tais como (Piedade & Aguiar, 2010):

- Geocompósito bentonítico;
- Geomenbranas- constituídas por materiais poliméricos ou betuminosos flexíveis com baixa permeabilidade;
- Geotêxtis- assumem funções drenantes, de filtração, separação, proteção e controlo de erosão ;
- Geocompósito drenante - material constituído por uma georrede, um geotêxtil, uma membrana e outro geotêxtil. A georrede assume funções de dreno e os geotêxtis funções de filtros.

Os materiais descritos podem ser aplicados de varias formas, assumindo diferentes funções. No entanto, de forma a que se obtenha o melhor proveito de cada um, deverá ter-se em consideração as suas características, tais como:

- Espessura;
- Resistência à tração;
- Extensão;
- Resistência ao punçoamento estático;
- Resistência ao punçoamento dinâmico;
- Atrito;
- Resistência ao rasgamento;
- Permeabilidade normal ao plano.

O sistema de drenagem de águas pluviais num aterro assume duas formas: separativo e unitário. O sistema separativo, como já foi referido, é utilizado na base do aterro, tendo

como principal objetivo minimizar a produção de lixiviados e consequentemente minimizar a afluência destes ao sistema de tratamento. A utilização de um sistema unitário nos taludes e zonas envolventes é feita de forma a assegurar o desvio das águas pluviais superficiais da área de confinamento e evitar fenómenos de erosão nos taludes do aterro. A utilização deste tipo de sistema permite a descarga, das águas precipitadas na zona envolvente do aterro, diretamente na rede de drenagem de águas pluviais ou a sua descarga nos terrenos limítrofes (Piedade & Aguiar, 2010).

O dimensionamento destes sistemas é um processo complexo, pois é necessário considerar as características do aterro, a pluviosidade da região onde se insere a infraestrutura, a área de solo impermeabilizado e os respetivos coeficientes de escoamento para cada tipo de revestimento.

A produção de lixiviados surge como resultado da infiltração da água proveniente da precipitação nos resíduos depositados, da humidificação dos resíduos de forma a acelerar o processo de decomposição, e da própria água contida os resíduos. Posto isto, é necessário a construção de um sistema que faça a sua recolha e os encaminhe para a estação de tratamento (Levy & Cabeças, 2006). Através da Figura F.1 demonstra-se o balanço hidráulico de um aterro sanitário que define a circulação de água no mesmo, e expõe a influencia das águas pluviais no processo de formação de lixiviados.

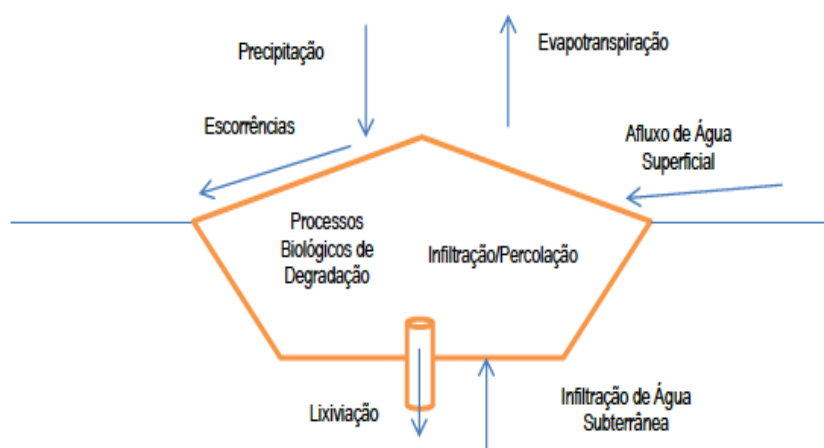


Figura A.1 - Balanço hidráulico de um aterro (Martinho & Gonçalves, 2000).

O sistema de drenagem de lixiviados tem como função assegurar o rápido escoamento dos lixiviados gerados no aterro, permitindo controlar a altura de líquido na célula de confinamento, minimizando o risco de infiltração de lixiviados no solo, por carga excessiva sobre o sistema de revestimento (LaGrega, Buckingham, & Evans, 2001).

Este sistema é essencialmente constituído por dois subsistemas, um na zona basal da célula de confinamento, e outro na zona periférica. Ao contrário do sistema instalado na zona basal da célula, o periférico é de cariz opcional, podendo ser instalado após a

construção do aterro, funcionando como um fator de segurança para o caso da colmatagem do sistema instalado na base da célula (McBean, Rovers, & Farquhar, 1995).

Os sistemas de drenagem de lixiviados instalados na base da célula podem assumir diversas configurações, nas Figuras A.2 e A.3 são apresentadas duas delas (LaGrega, Buckingham, & Evans, 2001).

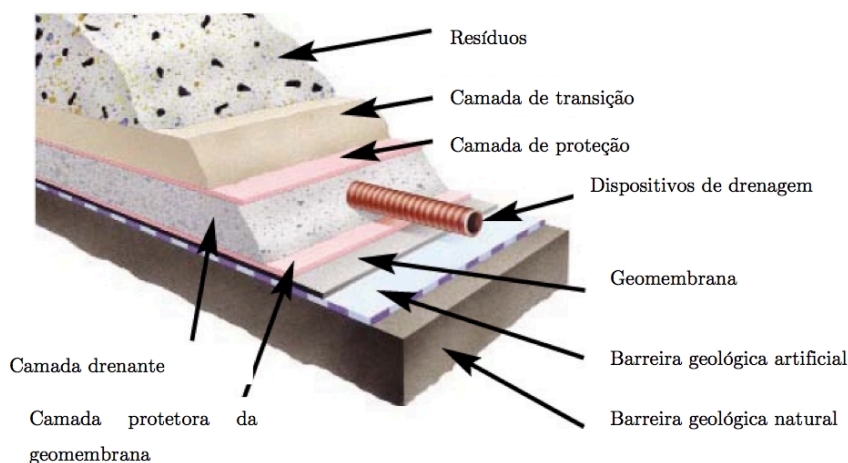


Figura A.2 – Sistema de impermeabilização simples

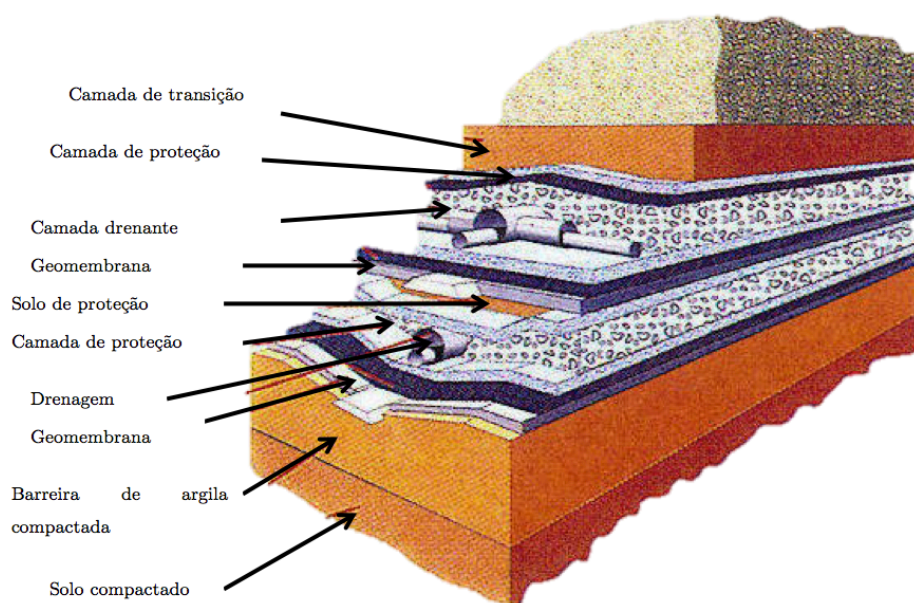


Figura A.3 – Sistema de impermeabilização duplo

Este sistema é normalmente constituído por uma camada granular de alta permeabilidade, que confere uma continuidade na ligação entre os resíduos e o sistema de drenagem, pela tubagem ranhurada envolta em geotêxtil e assente sobre uma camada de areia bem graduada de forma a servir de filtro para os finos, uma geomembrana e uma camada mineral de baixa permeabilidade compactada (LaGrega, Buckingham, & Evans, 2001).

Com a evolução das técnicas e dos materiais associados ao controlo e drenagem de lixiviados, este sistema pode ser constituído por multicamadas, como tem vindo a ser pratica corrente nos EUA (LaGrega, Buckingham, & Evans, 2001).

Posto isto, para o correto funcionamento do sistema de drenagem de lixiviados, para além das camadas granulares e mineral a aplicar, é necessário garantir uma inclinação mínima na totalidade do aterro, sendo de 2% como especificado no Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de agosto. O mesmo regulamento estabelece que a camada mineral drenante deve possuir uma espessura mínima de 0,5m, apresentar um valor igual ou superior a 10^{-4} m/s para a condutividade hidráulica e não deve conter material calcário. Ainda dentro dos requisitos para este sistema, salienta-se o espaçamento entre coletores, que está diretamente relacionado com o aumento do gradiente hidráulico, e a probabilidade da ocorrência de infiltrações para o caso de este de encontrarem demasiado espaçados. Caso aconteça o oposto e os coletores se encontrem demasiado próximos, será benéfico para a diminuição da quantidade de lixiviado presente no aterro mas, porém, aumenta o seu custo. É necessário, então, encontrar-se um ponto de convergência entre a funcionalidade e o custo (McBean, Rovers, & Farquhar, 1995).

A degradação da matéria orgânica contida nos resíduos leva, para além da produção de lixiviados, à produção de biogás, essencialmente constituído por metano e dióxido de carbono. A produção de biogás faz aumentar a pressão no interior do aterro para valores superiores à pressão atmosférica. Com o aumento da pressão, o gás é forçado a migrar através da área de confinamento para a atmosfera ou solos adjacentes aumentando o risco de degradação quer ambiental quer de saúde pública (Rhyner, Schwartz, Wenger, & Kohrell, 1990).

Com isto surge, então, a necessidade da instalação de um sistema de drenagem. Atualmente, o método utilizado consiste na instalação de drenos no interior da massa de resíduos, ligados a coletores que encaminham o biogás para o exterior da célula de confinamento. O processo de extração pode ser realizado utilizando um sistema de bombagem ou recorrendo à diferença de pressão entre o interior do aterro e a atmosfera, garantindo, desta forma, que o gás flui até ao sistema de drenagem. A extração do gás não resolve, por si só, o problema pois este não pode ser diretamente libertado para a atmosfera. Então, após a extração, o gás é submetido a tratamento, podendo ser encaminhado para um queimador, onde é eliminado, ou para uma estação, onde será energeticamente aproveitado para a produção de energia elétrica ou térmica (Piedade & Aguiar, 2010).

A.3. Requisitos de estabilidade

A estabilidade do aterro configura-se como um importante fato para o correto funcionamento deste, sendo necessário alguns cuidados na deposição de resíduos e com os solos adjacentes ao aterro. Assim sendo, a deposição de resíduos em aterro deverá ser feita de forma a assegurar a estabilidade da massa formada por estes e das estruturas associadas, permitindo evitar deslizamentos ou derrubamentos de zonas da célula de confinamento.

Os solos adjacentes, constituintes da fundação, estão diretamente relacionados com o processo de escolha da localização do aterro. Portanto, é de vital importância efetuar-se a completa caracterização dos solos presentes na fundação, determinando-se as características geológicas, geotécnicas e hidrológicas. Para tal, são efetuadas na fase de projeto prospecções geotécnicas (Vieira, 2013).

De forma a assegurar a estabilidade do aterro é necessário garantir que o solo possui as características mecânicas desejáveis. Problemas de falta de capacidade de carga da fundação, deformações excessivas e assentamentos diferenciais levam à rotura das impermeabilizações, permitindo infiltrações dos contaminantes nos solos adjacentes, pondo em causa as condições ambientais. No caso dos solos não possuírem as características geotécnicas desejáveis, estes poderão ser reforçados com a aplicação de geossintéticos, que proporcionam um aumento da capacidade de carga e a uma diminuição dos valores dos assentamentos que se poderão verificar (Russo M. , 2003).

A.4. Equipamentos, instalações e infraestruturas de apoio

Um aterro deve ser dotado de equipamentos, instalações e infraestruturas, que permitam para além do seu correto funcionamento, minimizar os efeitos nocivos para o ambiente provocados por emissões de cheiros e poeiras, elementos dispersos pelo vento, ruído e tráfego, aves, roedores e insetos, formação de aerossóis e incêndios. Alguns destes efeitos, nomeadamente as emissões de poeiras, odores e proliferações de roedores e aves podem ser atenuados ou evitados recorrendo a uma cobertura diária da massa de resíduos (Tchobanoglous, Theison, & Vigil, 1993). Na impossibilidade de se realizar esta cobertura diária, poderão ser utilizadas outras técnicas, como a diminuição da área de deposição e o aumento da compactação dos resíduos. Atualmente, nos Estados Unidos, são utilizados filmes plásticos biodegradáveis como cobertura diária, que permitem desviar águas pluviais e evitar o envio de emissões para a atmosfera (Cadwallader, 2012). De forma a garantir a circulação no interior das instalações do aterro, este deve possuir vias capacitadas para tal efeito. Estas vias são essencialmente de dois tipos, principais e secundárias. As vias principais, de carácter definitivo, fazem a ligação aos diversos edifícios existentes na zona do aterro, enquanto que as vias secundárias, servem apenas para a circulação dentro dos

alvéolos de deposição e nas zonas de empréstimo de terras, podendo ser em macadame betuminoso (Russo M. , 2003). Estas vias devem obedecer a alguns requisitos como (Piedade & Aguiar, 2010):

- Largura mínima de 6m de forma a permitir o cruzamento de veículos;
- Inclinações inferiores a 10%;
- O pavimento acima do sistema de revestimento do aterro com espessura de 0,60 m.

A construção de um aterro deve, ainda, garantir que não haja dispersão de poluentes nos terrenos limítrofes ou na via pública, que este se encontre devidamente selado, de forma a não permitir o livre acesso ao local, e deve garantir a instalação de medidas que permitam detetar e dissuadir descargas ilegais.

A.5. Controlos nas fases de exploração e pós-encerramento de aterros

A.5.1. Fase de exploração

A.5.1.1. Manual de exploração

Na fase de exploração de um aterro o operador deverá ter em sua posse o manual de exploração do aterro, onde são estabelecidos os procedimentos sobre operação e manutenção do mesmo. Neste manual estão presentes procedimentos para controlo de resíduos na estrada do aterro, esquema do seu enchimento, plano de monitorização , sistema de manutenção e controlo de funcionamento das infraestruturas existentes, requisitos técnicos para a selagem e encerramento do aterro, e medidas de prevenção de incidências, acidentes e incêndios, e as medidas a tomar no caso de ocorrência destes.

A.5.1.2. Relatórios de atividade e registos

Os relatórios de atividade são elaborados anualmente pelo operador, de forma a demonstrar à entidade licenciadora o ponto de situação do aterro, referindo nomeadamente a superfície ocupada por resíduos, o volume e composição destes, métodos de deposição, cálculo da capacidade restante, início e duração do processo de deposição e o plano de enchimento. Neste relatório devem constar, ainda, os processos, análises, resultados e conclusões dos controlos efetuados na fase de exploração da infraestrutura.

O operador deve, também, efetuar um registo sistemático de guias de acompanhamento referentes a cada produtor, de operações de enchimento e selagem, levantamentos de dados topográficos, de dados meteorológicos diários, de resultados de todas as análises e medições efetuadas, e de anomalias verificadas no aterro, devendo estes registos ser conservados até ao final da fase de acompanhamento e encerramento da instalação.

A.5.1.3. Controlo de assentamentos e enchimento

Neste tipo de infraestrutura, a verificação da estabilidade é feita recorrendo a uma correta deposição dos resíduos de forma a evitar assentamentos, que podem acarretar outros problemas, tais como a rotura dos sistemas de drenagem e a contaminação de solos e águas na zona envolvente do aterro. Para que tal não se verifique, o operador deve controlar anualmente o assentamento da massa de resíduos. Este controlo é feito recorrendo à colocação de marcos topográficos devidamente previstos para o efeito e ao respetivo levantamento, efetuado uma vez por ano.

A.5.1.4. Controlo de lixiviados

O controlo de lixiviados de ser feito pelo operador frequentemente, sendo necessário monitorizar o seu volume, nível e qualidade, estando a frequência com que este controlo deve ser feito, estabelecido na tabela n.º1 da parte A do anexo III do DL n.º183/2009, de 10 de agosto. No caso de bacias de lixiviados, o operador deve medir o caudal de entrada semanalmente e sempre após a ocorrência de uma precipitação significativa e controlar diariamente a capacidade disponível da bacia. Caso se verifique alguma fuga, a bacia deverá ser esvaziada de imediato e reparada, devendo o entidade licenciadora informada do ocorrido.

A.5.1.5. Controlo de águas superficiais e subterrâneas

Durante a fase de exploração o operador deverá também efetuar um controlo de águas superficiais e subterrâneas. Para tal, e de forma a ter um valor de referencia, antes do inicio da exploração do aterro, este deverá proceder à recolha de análises de amostras das águas superficiais, em pelos menos dois pontos, a montante e jusante do aterro. O controlo das águas superficiais tem periodicidade trimestral, sendo efetuado nos mesmos pontos das amostras recolhidas.

O procedimento de recolha de amostras como valor de referencia para águas subterrâneas é feito de forma análoga ao já descrito para águas superficiais, no entanto para o controlo deste tipo de águas, é instalada uma rede de piezómetros através dos quais são colhidas amostras. Para a recolhas destas amostras devem ser cumpridos os requisitos estabelecidos na Norma ISO 5667-18. Os parâmetros a controlar para o tipo de água em questão estão definidos na tabela n.º 2 da parte A do anexo III do DL 183/2009, de 10 de agosto.

A lista de parâmetros a analisar acima referida, difere em função da composição do lixiviado e da qualidade das águas subterrâneas, podendo a ARH indicar a lista de análises que entender ser a mais conveniente. Caso se verifiquem variações significativas da qualidade das águas, o operador deverá comunicar a entidade licenciadora, e proceder de imediato à recolha de amostras em todos os pontos de água subterrânea e estabelecer a

sua análise. Posto isto e da responsabilidade do operador também implementar medidas corretivas e implementar o programa de reposição das condições ambientais.

A.5.1.6. Controlo de biogás

O controlo de biogás produzido no aterro deve ser feito em relação a cada alvéolo da célula de confinamento. No controlo efetuado devem ser calculadas, mensalmente, as emissões de gases, variando os gases controlados em função da composição dos resíduos.

A.5.2. Fase de encerramento

A.5.2.1. Cobertura final

Grande parte dos lixiviados produzidos deve-se a infiltração de água através da cobertura do aterro, devendo esta merecer alguns cuidados aquando da sua projeção e execução. No entanto o encerramento de um aterro recorrendo a construção de uma cobertura não acontece apenas de forma a reduzir a produção de lixiviados, surge também de forma a (LaGrega, Buckingham, & Evans, 2001):

- Controlar a presença de animais que poderão introduzir doenças nos ecossistemas;
- Proteger a população do contato direto com os resíduos;
- Controlar as movimentações do biogás no interior do aterro, evitando a sua emissão para a atmosfera;
- Controlar o escoamento superficial;
- Resistir à erosão;
- Evitar a dispersão de poeiras;
- Minimizar a propagação de odores;
- Garantir um enquadramento paisagístico.

A cobertura de um aterro deverá conjugar fatores como segurança e enquadramento paisagístico com requisitos de permeabilidade e compressibilidade, garantido uma capacidade de suporte para uma camada vegetal e para cargas futuras introduzidas pelo uso dado ao espaço (LaGrega, Buckingham, & Evans, 2001).

A constituição desta cobertura pode variar de caso para caso, no entanto são usualmente utilizadas (Shah, 2000):

- Uma cobertura vegetal – que assegura o enquadramento paisagístico através da através da vegetação implementada. Esta camada ajuda a manter o balanço hidrológico, previne fenómenos de erosão, devido à vegetação, e aumenta a evapotranspiração. A escolha do tipo de vegetação é um fato importante, devendo ser escolhida só vegetação cujo o crescimento das raízes não ultrapasse a camada de solo vegetal;

- Uma camada subjacente à cobertura vegetal constituída por um geotêxtil – tem como função proteger a camada drenante, evitando o movimento de partículas da camada vegetal para esta;
- Uma camada drenante – trata-se de uma camada constituída por material britado com grande permeabilidade e por uma sistema de drenos que recolhe a água infiltrada através da camada vegetal;
- Uma barreira hidráulica - constituída por material argiloso ou uma membrana sintética de baixa permeabilidade, tem como função minimizar as infiltrações para a massa de resíduos;
- Uma camada de fundação – que assegura a proteção da barreira hidráulica da massa de resíduos

De forma a ser mais perceptível a disposição das camadas, a Figura A.4 ilustra um pormenor tipo da cobertura de um aterro.

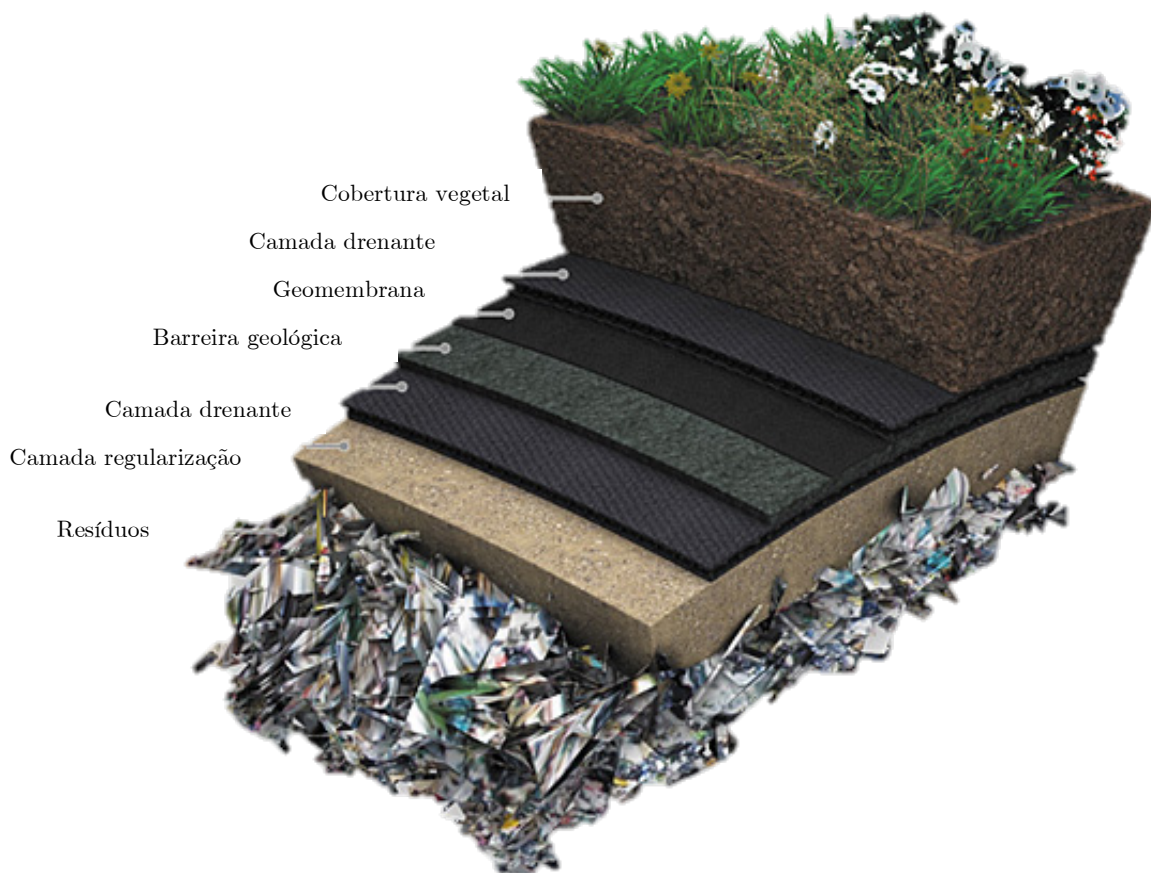


Figura A.4 - Esquemas de cobertura de aterro

Um dos problemas que este tipo de cobertura enfrenta é a erosão, que poderá surgir devido ao escoamento superficial gerado pela precipitação. Este fato pode ser atenuado,

como já referido, pela presença de vegetação, mas torna-se necessária o projeto de uma série de elementos, tais como valas, valetas e valas de banquetas, que garantam a recolha e controlo do escoamento. É importante salientar que, para o correto funcionamento destes elementos, é necessária uma manutenção periódica.

A.5.3. Fase de pós-encerramento

A.5.3.1. Relatórios

Concluída a fase de exploração do aterro e efetuado o seu encerramento, o operador deverá elaborar e entregar à entidade licenciadora uma planta topográfica do local, frisando uma série de elementos, tais como o perímetro de cobertura, as instalações existentes, as bacias de lixiviados e o sistema de drenagem de águas pluviais. Posto isto, resta ao operador enviar anualmente um relatório a entidade licenciadora onde conste o estado do aterro, as operações de manutenção e os resultados dos controlos efetuados.

A.5.3.2. Manutenção

De forma a garantir o correto funcionamento do aterro após o seu encerramento, será necessário, também, garantir o correto funcionamento das infraestruturas existentes através da conservação do seu estado com a realização de manutenções periódicas. Exemplos destas infraestruturas são:

- A cobertura final;
- Sistema de drenagem e de tratamento de lixiviados;
- Rede de águas pluviais e piezómetros de controlo da qualidade das águas subterrâneas;
- Sistema de drenagem de biogás.

A.5.3.3. Controlo de assentamentos

A semelhança do controlo feito na fase de exploração, também na fase e de pós-encerramento é necessário efetuar-se um controlo de eventuais assentamentos do aterros pelos mesmos motivos já enunciados anteriormente. Relativamente a este controlo, resta apenas referir que este deve ser efetuado anualmente.

A.5.3.4. Controlo de lixiviados

O controlo de lixiviados nesta fase difere consoante o tipo de aterro em causa. Para aterros de resíduos não perigosos e aterros de resíduos perigosos, este controlo da qualidade do lixiviado deverá ser verificada semestralmente, enquanto que no caso de aterros de resíduos inertes este controlo será anual. O controlo da qualidade do lixiviado consiste na medição da quantidade de lixiviados produzida, bem como a sua constituição.

A.5.3.5. Controlo de águas subterrâneas e superficiais

Outro fator importante na fase de pós-encerramento de um aterro é o controlo da qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Para o caso de águas superficiais, este controlo deve ser feito com uma periodicidade semestral, nos mesmos pontos onde se efetuou este controlo na fase de exploração.

As águas subterrâneas deverão ser controladas através do nível verificado nos piezómetros de controlo e dos parâmetro de pH, condutividade e cloretos. Este controlo tem também uma periodicidade semestral.

A.5.4.6. Controlo de gases

O controlo de gases tem uma periodicidade semestral, sendo este assegurado pela controlo da sua composição, nomeadamente das concentrações de metano e dióxido de carbono.

Anexo B – Materiais

B.1. Polietileno

Toda o sistema de drenagem de lixiviados é constituído por tubagens em PEAD. O polietileno é uma resina termoplástica, designada de resina poliolefinica, obtida através da polimerização do gás etileno, resultante do *cracking* da nafta do petróleo. No mercado nacional podem ser encontradas tubagens feitas através de três resinas, PE63 ($\sigma=5,0$ MPa), PE80 ($\sigma=6,3$ MPa), PE100 ($\sigma=8,0$ MPa), sendo σ as tensões de dimensionamento de cada tipo de resina (Sá Marques & Sousa, 2011).

Existem essencialmente três tipos de tubagem em polietileno (Sá Marques & Sousa, 2011):

- PEBD - Polietileno de baixa densidade ($d \leq 0,93$);
- PEMD - Polietileno de media densidade ($0,93 < d \leq 0,94$);
- PEAD - Polietileno de alta densidade ($d > 0,94$).

A obtenção das diferentes classes deve-se às variações das condições pressão, temperatura e à presença de catalisadores no processo de polimerização. A variação da densidade do material é devida à variação da porção cristalina presente, que varia entre os 60 e os 80%, levando a densidade a oscilar entre os valores já referidos (Martins, 2007).

A utilização de tubagens e acessórios neste tipo de material apresenta algumas vantagens, como:

- Leveza do material que facilita a sua montagem;
- Flexibilidade que facilita a utilização em trajetos sinuosos;
- Os sistemas de união são variados e simples;
- Possibilidade de utilização em troços de grandes dimensões, minimizando o número de uniões;
- A montagem pode efetuar-se fora da vala;
- Facilidade de reparação;
- Exige menos condições de nivelamento do fundo da vala;
- Insensível à corrosão;
- Resistem à maior parte dos ataques químicos;
- Resistem a tensões e deformações elevadas com cargas instantâneas;
- Apresentam uma vida útil de mais de 50 anos;
- Apresentam um coeficiente de dilatação térmico elevado, no entanto as tensões induzidas são pequenas;
- Permitem o assentamento do terreno sem que haja perda de estanquidade;
- Insensíveis à congelação;
- Baixa celeridade, fator importante para a atenuação do golpe de ariete;

- A resistência à abrasão é maior que a do aço;
- Suportam pressões de serviço elevadas;
- Baixo coeficiente de rugosidade
- Resistência a ambientes e solos agressivos e a agentes químicos
- Facilidade de identificação mediante coloração dos tubo.

Algumas das desvantagens deste tipo de material são, a degradação por radiação solar e calor, a degradação devida ao contacto com solventes e hidrocarbonatos e a dificuldade na detecção de fugas no escoamento.

B.1.1. Comercialização

As tubagens em PEAD são comercializadas em diâmetros nominais ou diâmetro exterior, que vão desde 25 mm até 1200 mm e classes de pressões de serviços de 0,8; 1,2; 2,0 e 2,5 MPa. As tubagens de diâmetro mais baixo são comercializadas em rolos de 50 ou 100 metros, sendo que diâmetros a partir de 110 mm são encontrados em varas de 12 m. Outra das características das tubagens de PEAD é a coloração da risca presente no tubo, definindo esta a utilização a que se destina a tubagem:

- Risca azul – transporte de água potável;
- Risca castanha – transporte de água não potável;
- Risca amarela – transporte de gás e combustíveis gasosos.

Na obra em estudo, para o sistema de drenagem de lixiviados foram utilizadas tubagens com Ø315 da classe PN10 de risca castanha. Na zona basal da célula, a tubagem possui as mesmas características, no entanto encontra-se ranhurada a 120°.

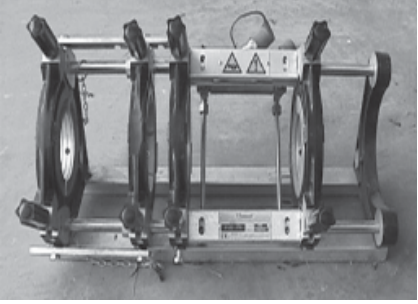
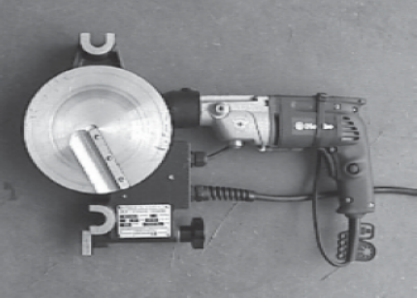
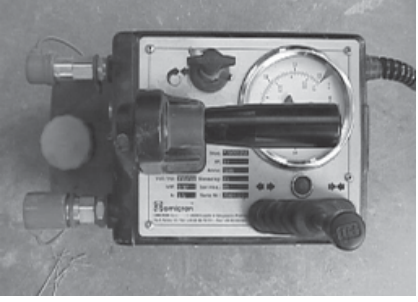
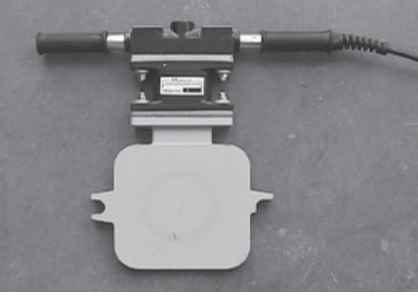

B.1.2. Tipos de juntas

As tubagens em polietileno podem ser unidas através soldaduras ou juntas mecânicas. A escolha do tipo de ligação a efetuar, deve ter em consideração a formação dos operadores, a classe de pressão e diâmetros do tubo, e o meio ambiente em que esta se realiza.

B.1.2.1. Soldadura topo a topo

Este tipo de soldadura é o mais utilizado em tubagem de polietileno para diâmetros superiores a Ø90 . A soldadura topo a topo consiste na ligação entre tubos ou acessórios por fusão do material, nas zonas de contacto entre os elementos a soldar. Para a realização desta ligação é necessário o equipamento ilustrado na Tabela B.1.

Tabela B.1 – Material necessário para a realização de uma soldadura topo a topo

	<p>Interface de fixação/ deslocamento – é constituída por duas maxilas fixas e duas móveis. Permite a fixação e deslocamento da tubagem durante o processo de soldaduras.</p>
	<p>Interface de corte – destina-se à retificação em simultâneo dos topos dos elementos a soldar.</p>
	<p>Transmissão – destina-se a transmitir a força necessária à interface de fixação/deslocamento.</p>
	<p>Placa de aquecimento – destina-se à transmissão de calor aos topos dos elementos a soldar.</p>
	<p>Estabilizador de corrente - destina-se a estabelecer corrente elétrica aos vários constituintes da maquina</p>

- **Execução**

1 - A execução da soldadura pode ser realizada em vários passos. O primeiro passo passa pela proteção do posto de soldadura, para o caso de esta se realizar na presença de

condições climatéricas adversas, como chuva, vento ou temperaturas inferiores a 0°C. Outro cuidado que poderá ser necessário diz respeito ao tamponamento da tubagem, de forma a evitar o arrefecimento repentino da soldadura provocada pelo fluxo de ar no interior da tubagem.



Figura B.1 -Proteção do posto de soldadura por tenda

2 - O passo seguinte consiste na verificação da perpendicularidade do corte da tubagem e pré-montagem da mesma. Caso o topo da tubagem não apresente um plano perpendicular ao seu eixo, deverá proceder-se ao corte dos extremos. A pré-montagem consiste no posicionamento de um dos tubos na parte fixa da máquina, e o respetivo aperto das maxilas, seguindo-se a colocação do outro elemento a soldar na parte móvel. O aperto das maxilas deve ser feito de forma uniforme para evitar eventuais desalinhamentos das extremidades.



Figura B.2 - a)Pré-montagem parte móvel; b)Pré-montagem dos dois elementos a soldar

3 - De seguida, e de forma a eliminar possíveis imperfeições e a camada oxidada, procede-se à retificação dos topos. Este passo consiste na colocação da retificadora entre os elementos a soldar, de forma a obter-se um paralelismo entre as faces. Finalizada a retificação obtém-se uma fita contínua de material nos dois extremos e é verificada a regularidade das duas superfícies através da aproximação até ao contacto das mesmas.

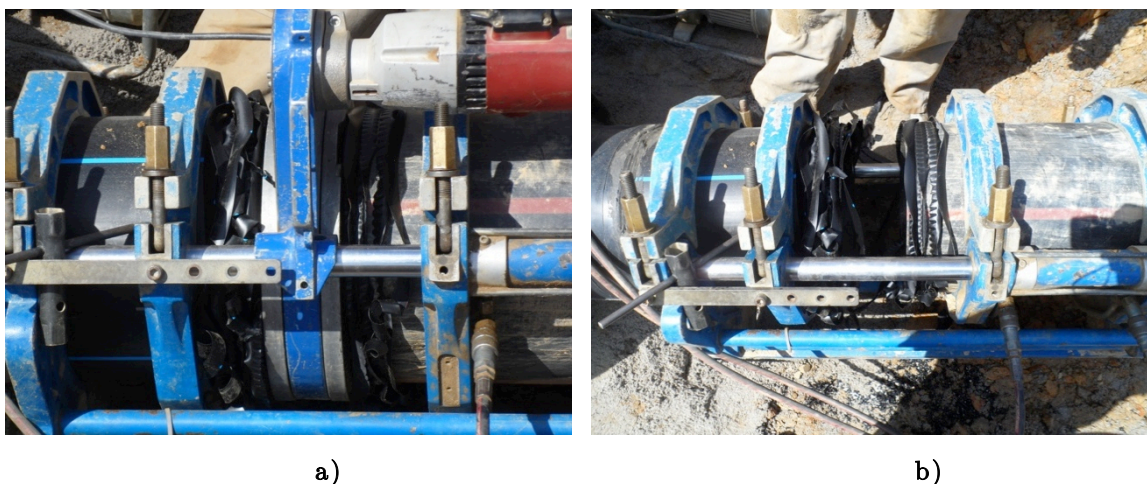


Figura B.3 – a) retificação com recurso à retificadora; b) aspeto após retificação

4 - Verificada a regularidade das superfícies, procede-se ao alinhamento dos elementos a soldar. Este alinhamento/nivelamento é feito face ao equipamento de soldadura de forma a tonar coincidentes os eixos das tubagens.



Figura B.4 - a) realinhamento dos elementos recorrendo a escavadora; b) verificação do nivelamento de caixa de visita, feito de forma a garantir a pendente necessária.

5 – Outro processo importante antes da execução da soldadura é a limpeza das superfícies de contacto dos elementos a soldar, garantindo assim que estas se encontram limpas e desengorduradas. A limpeza é feita recorrendo a um líquido de limpeza adequado.



Figura B.5 -Limpeza das superfícies de contato.

6 – Antes da execução da soldadura é também necessário determinar a pressão de pré-aquecimento. A pressão de aquecimento determina-se pela soma da pressão de arrasto com pressão de soldadura. A pressão de soldadura é dada pelas tabelas existentes, dependendo do diâmetro e espessura da tubagem, enquanto que a pressão de arrasto é determinada em função do tipo e comprimento do tubo. Esta consiste no aumento progressivo da pressão, com a tubagem colocada na parte móvel, até se conseguir um deslocamento do conjunto.

7 - De seguida deve limpar-se a superfície da placa de aquecimento com um pano impregnado com um liquido desengordurante e verificar a sua temperatura. O valor da temperatura é fornecido pelo fabricante do equipamento, sendo normalmente cerca de 201°C.



Figura B.6 – Limpeza da superfície da placa de aquecimento

8 – Posto isto, coloca-se a placa de aquecimento entre as superfícies a soldar e aplica-se a força de pré-aquecimento até se conseguir um rebordo uniforme em todo o seu perímetro. De seguida, a força de pré-aquecimento é reduzida, passando esta a designar-se por pressão

de aquecimento. Esta pressão é mantida durante o tempo aquecimento estabelecido para a tubagem em causa.



Figura B.7 – Aquecimento das extremidades a soldar.

9 – Acabado o tempo de aquecimento, a placa é retirada e unem-se os elementos a soldar. É aplicada uma pressão que é aumentada progressivamente até se atingir a pressão de soldadura, sendo esta mantida durante o tempo estabelecido pelo fabricante.



a)

b)

Figura B.8 – a) Retirada da placa de aquecimento; b) Aplicação da pressão de soldadura.

10 – Por fim, após concluída a operação de soldadura, as maxilas do equipamento são desapertadas e é avaliada a qualidade da soldadura.



Figura B.9 – Aspetto final da soldadura (exemplo ligação de tubagem a caixa de visita)

De forma a tornar mais perceptível os tempos em que se pode dividir este tipo de soldadura, é apresentado na Figura E.10 um gráfico que relaciona os intervalos de tempo existentes numa soldadura com a pressão a aplicar.

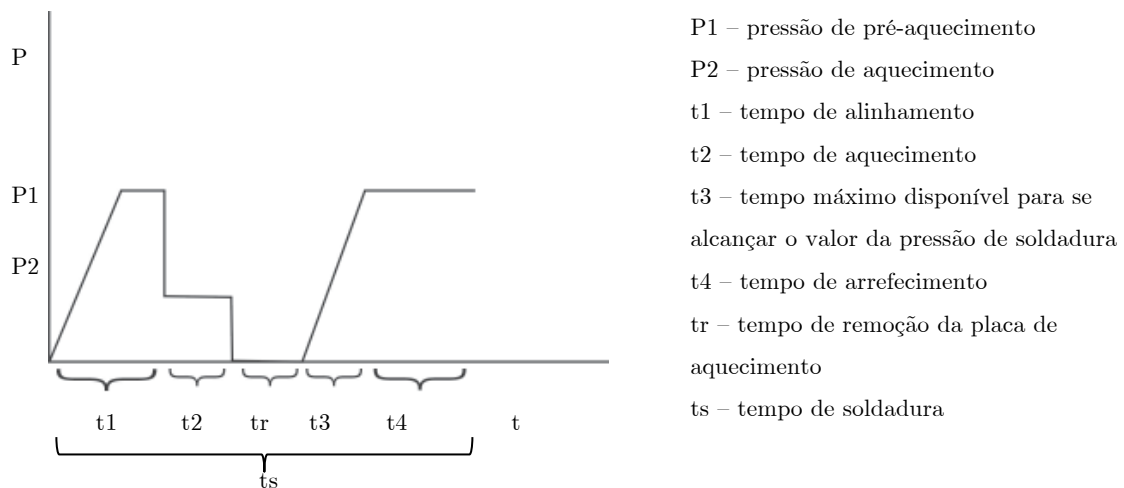


Figura B.10 –Relação intervalos de tempo/ pressão a aplicar

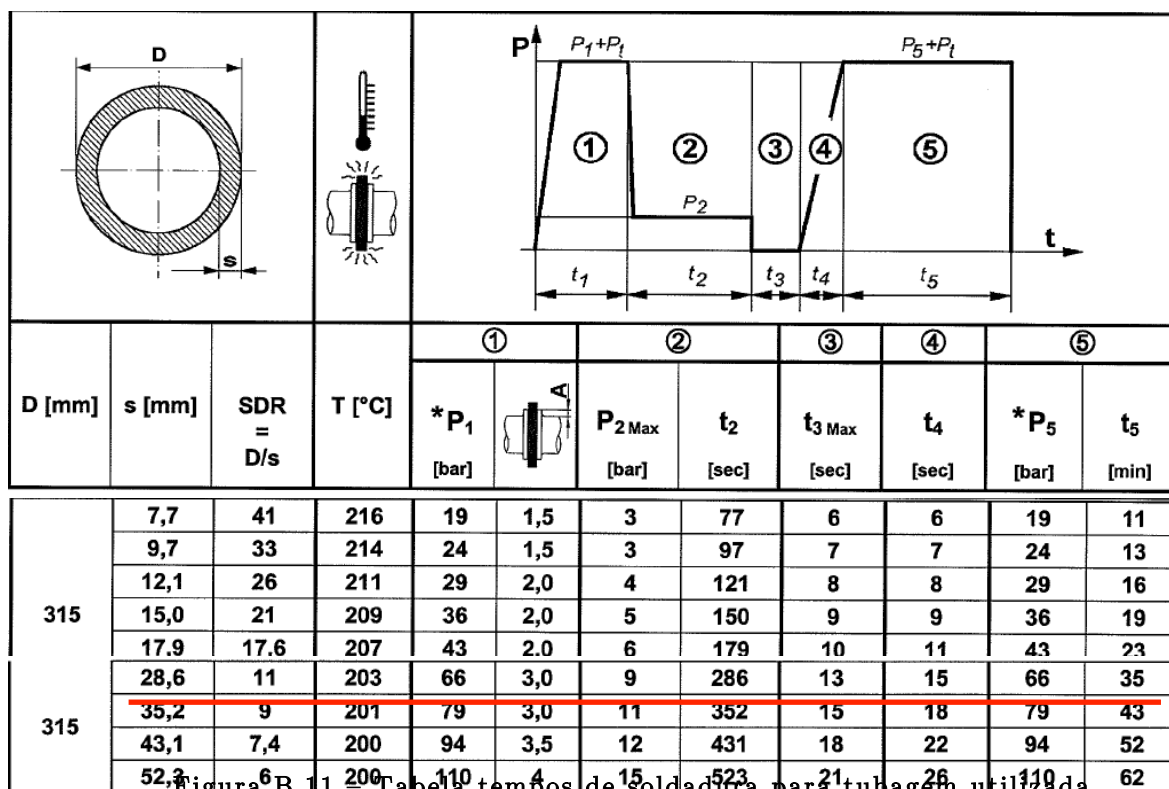



Figura B.11 – Tabela tempos de soldadura para tubagem utilizada

B.1.2.2. Soldadura por eletrofusão

Este tipo de soldadura consiste na ligação de tubagens ou outros elementos, através de acessórios electrosoldáveis, por recurso a fusão do material nas zonas de contato dos elementos a soldar. Para que tal seja possível, os acessórios eletrosoldáveis têm incorporadas resistências elétricas, que são aquecidas recorrendo a aplicação de tensão pela máquina que faz a ligação aos terminais dos acessórios. Para a realização da soldadura por eletrofusão é necessário o seguinte equipamento:

Tabela B.2 – Equipamento necessário para a realização soldadura por eletrofusão

	Máquina de soldar por eletrofusão – permite o controlo e fornecimento de energia a todo o processo de soldadura
	Cabos de ligação – permitem a ligação da máquina aos terminais dos acessórios electrosoldáveis

Os acessórios eletrosoldáveis existem no mercado em diversas gamas, tais como curvas, tês, reduções, uniões e tomadas de carga. Estes acessórios possuem zonas de fusão e de arrefecimento, sendo o comprimento destas muito importante, pois é através deste que se limita a zona de fusão e controla a pressão no acessório ao longo do processo.

- **Execução**

Tal como acontece no processo de soldadura topo a topo, o processo de soldadura por eletrofusão também se divide em alguns passos.

1 - O primeiro passo deste processo passa pela proteção do posto de soldadura, de forma que este se faça protegido de chuvas, ventos, e temperaturas abaixo de 0°C.

2 – O passo seguinte passa pela preparação das extremidades dos elementos a soldar. Neste passo, numa primeira abordagem, deve-se garantir que as extremidades dos elementos a soldar se encontram paralelas ao seu eixo. Garantida a perpendicularidade das extremidades e antes do início da soldadura, deve, ainda, ser eliminada a cama de óxido presente na zona onde será instalado o elemento eletrosoldável. Esta camada surge por influência atmosférica e, caso não seja removida, dificulta a execução da soldadura. A eliminação desta camada é feita por raspagem e até a uma profundidade máxima de 0,1 mm sobre toda a superfície cilíndrica.



Figura B.12 – Processo de raspagem

3 – Feita a raspagem da superfície da extremidade deve proceder-se à limpeza desta com um líquido de limpeza adequado de forma a garantir uma superfície de contacto limpa e desengordurada.



Figura B.13 – Limpeza da superfície.

4 – Antes de se proceder à montagem deve marcar-se a profundidade de encaixe do acessório na tubagem. A profundidade de encaixe é determinada colocando o acessório numa extremidade da tubagem até que esta entre em contacto com o batente interior do acessório.



Figura B.14 – Determinação da profundidade de encaixe.

5 – Feita a marcação da profundidade de encaixe procede-se à montagem da união. Nesta fase deve garantir-se que a inserção dos extremos das tubagens se encontra feita até as marcações de profundidade referidas no passo anterior.

6 – Posto isto, pode efetuar-se a soldadura. Para tal, são ligados os terminais do cabo da máquina de soldar e são introduzidos os valores de pressão e tempo de soldadura para o tipo de tubagem a soldar.



Figura B.15 - Ligação dos terminais.

7 – Finalizada a soldadura são retirados os cabos e deixa-se arrefecer. O tempo de arrefecimento da soldadura é normalmente fornecido por uma tabela que acompanha o acessório.



Figura B.16 – Aspeto final da soldadura.

B.1.2.3. Juntas mecânicas

Além das ligações soldadas, foram também executadas ligações mecânicas. Estas ligações são feitas recorrendo a acessórios plásticos, como uniões, reduções, tês ou curvas, sendo utilizadas para ligações entre tubagens com pequenos diâmetros. Estes acessórios de ligação são constituídos por um corpo que se une ao tubo, um aro dentado de fixação, que pode ser plástico ou metálico, uma junta de estanquidade, e uma peça roscada ou aparafusada ao corpo. As vantagens de utilização destas ligações são:

- Serem resistentes às solicitações químicas;
- Apresentam um período de vida útil semelhante ao das tubagens;
- Serem reutilizáveis.

Anexo C – Monitorização de águas subterrâneas

O sistema de monitorização de águas subterrâneas do novo aterro de resíduos da Suldouro tem como objetivo verificar a eficácia do sistema de impermeabilização do mesmo, através da recolha de amostras de águas subterrâneas e verificação da sua qualidade com recurso à realização de análises às mesmas. Este sistema de monitorização permite ainda a verificação do nível de água nos lençóis freáticos.

Para tal, foi definida uma rede de sete piezómetros a executar de acordo com as localizações apresentadas na Figura C.1.

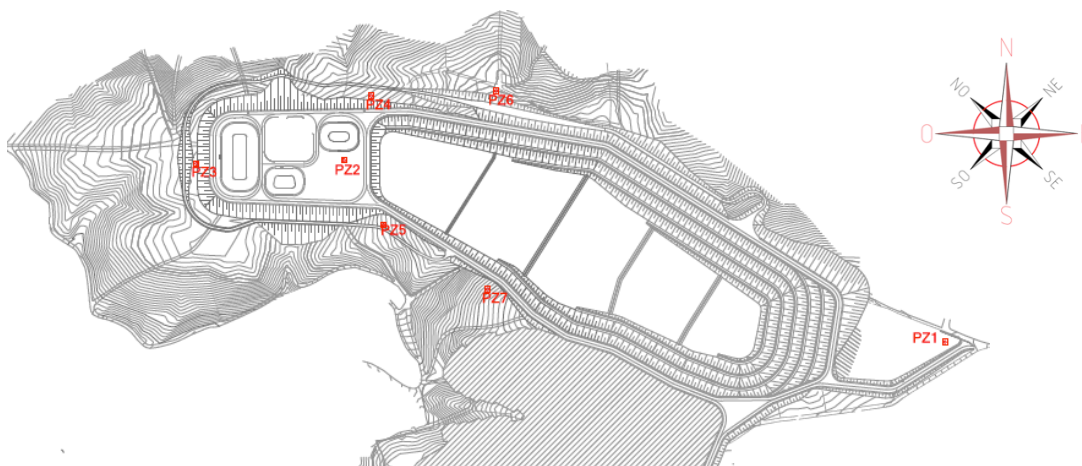


Figura C.1 - Localização de piezómetros do sistema de monitorização

A rede de piezómetros a executar contempla dois tipos de piezómetros: simples e duplos. Como se pode verificar através da Tabela C.1, quatro dos sete piezómetros são simples, sendo os restantes três duplos. O que diferencia estes dois tipos é, como a própria designação indica, o número de poços de recolha, sendo o simples constituído por apenas um e o duplo por dois. No caso em estudo, os piezómetros simples permitem apenas o controlo da qualidade das águas subterrâneas a grandes profundidades (de 10 a 35 m), enquanto que os duplo para além de permitirem o controlo de águas profundas, permitem também o controlo de águas que se encontram mais próximas da superfície (1 a 10 m).

Tabela C.1 – Identificação do tipo de piezómetros

	Simple	Duplo
PZ1		✓
PZ2		✓
PZ3		✓
PZ4	✓	
PZ5	✓	
PZ6	✓	
PZ6	✓	

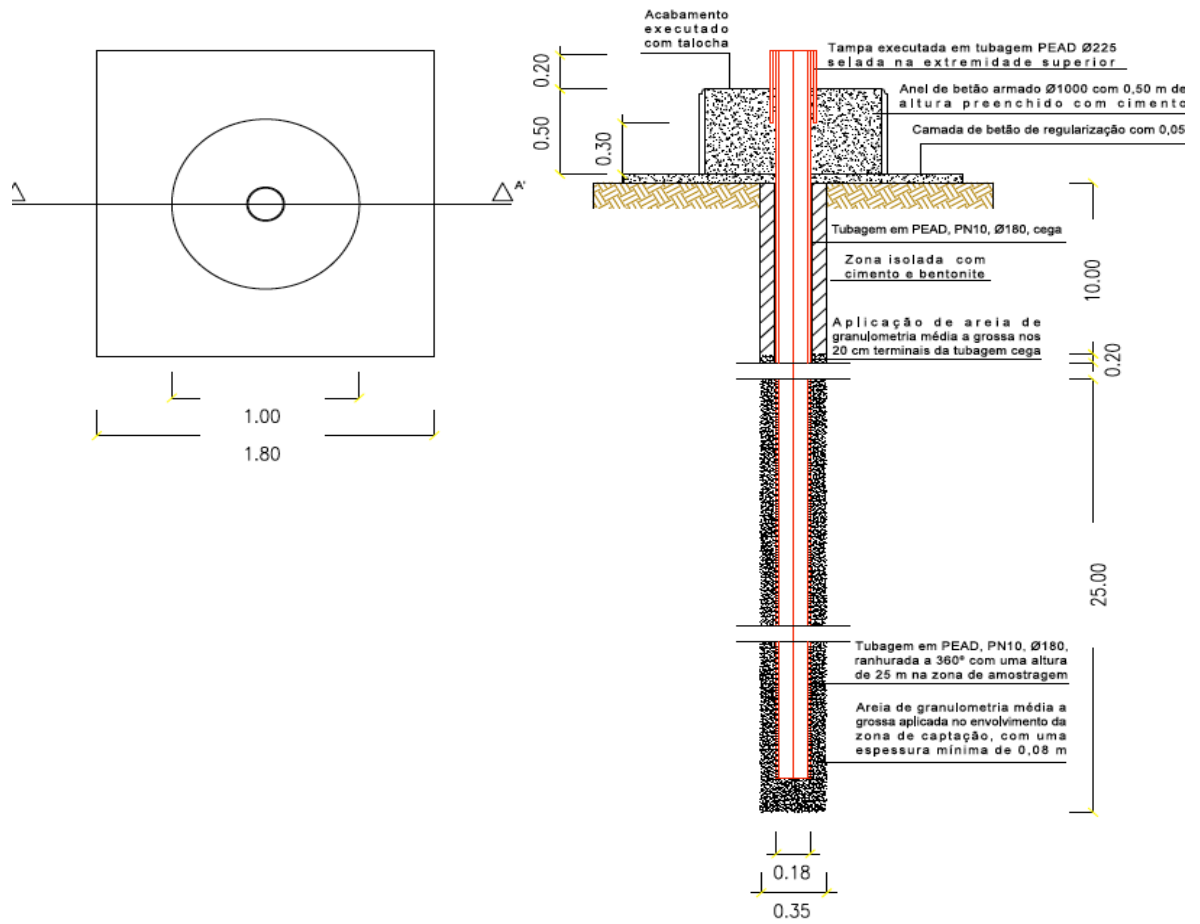


Figura C.2 - Pormenor piezómetro simples

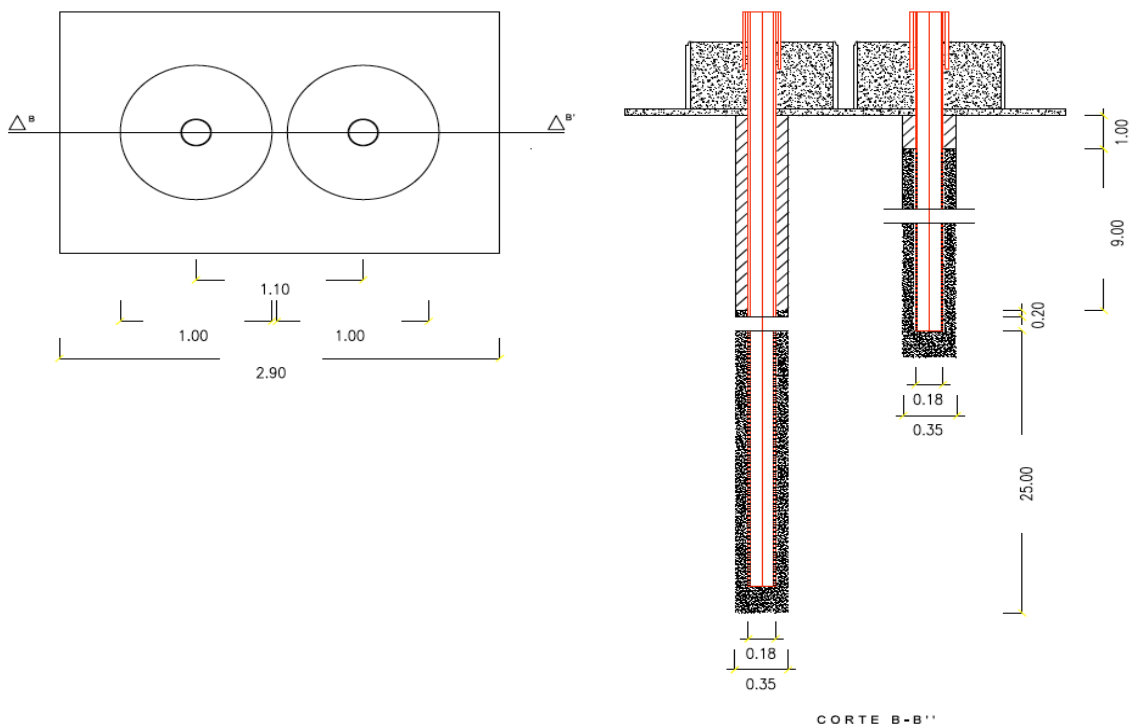


Figura C.3 - Pormenor piezómetro duplo

A disposição dos piezómetros, como é possível verificar-se na Figura C.1 vai ao encontro das zonas passíveis de maior risco de contaminação, sendo a maioria concentrados na zona de jusante da célula de confinamento e estação de tratamento de lixiviados. Assim sendo, dos três piezómetros duplos a executar, um localiza-se a montante do aterro e dois a jusante da célula de confinamento. Os restantes quatro piezómetros simples, localizam-se em zonas de influência do sistema de drenagem sub-superficial do aterro, onde, por efeito deste, o nível freático se situara abaixo da cota basal do aterro.

O piezómetro a executar a montante da célula de confinamento, terá funções semelhantes a dos restantes seis, sendo que os valores obtidos em análises realizadas a amostras recolhidas neste ponto são considerados valores de referência para os restantes piezómetros.

Os parâmetros a verificar na realização das análises, bem como a periodicidade da sua realização, encontram-se descritas no Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de agosto, tendo sido também já referidos no capítulo 2 do presente trabalho.

C.1. Metodologia de construção da rede de piezómetros

Para a execução da rede de piezómetros recorreu-se a um método de perfuração designado por rotopercurssão ou precursão pneumática com martelo de fundo de furo. Este método de perfuração caracteriza-se essencialmente pela combinação de ações de esmagamento e corte, resultantes da combinação do movimento de percussão de elevada frequência e pequeno curso, transmitido pelo martelo de fundo de furo, com um movimento de rotação de um “bit”, transmitido pelas hastes de perfuração.

O funcionamento do martelo é assegurado pelo fluxo de ar comprimido produzido, produzido por um compressor, sendo transmitido ao martelo através do interior da coluna de perfuração. A injeção deste fluxo de ar para além de assegurar o funcionamento do martelo, permite também a limpeza do furo.

A escolha deste método de perfuração em detrimento de métodos como perfuração por rotação com circulação inversa, com circulação direta ou precursão mecânica, surge devido as características do solo presente e ao tipo de furação que se pretende. Assim sendo, este método torna-se o mais conveniente pois permite rapidez de execução e remoção de detritos com elevada eficácia para solos constituídos por rochas duras e consolidadas, permite execução de furos com diâmetro mais reduzido, e implica custos mais baixos que os restantes métodos.

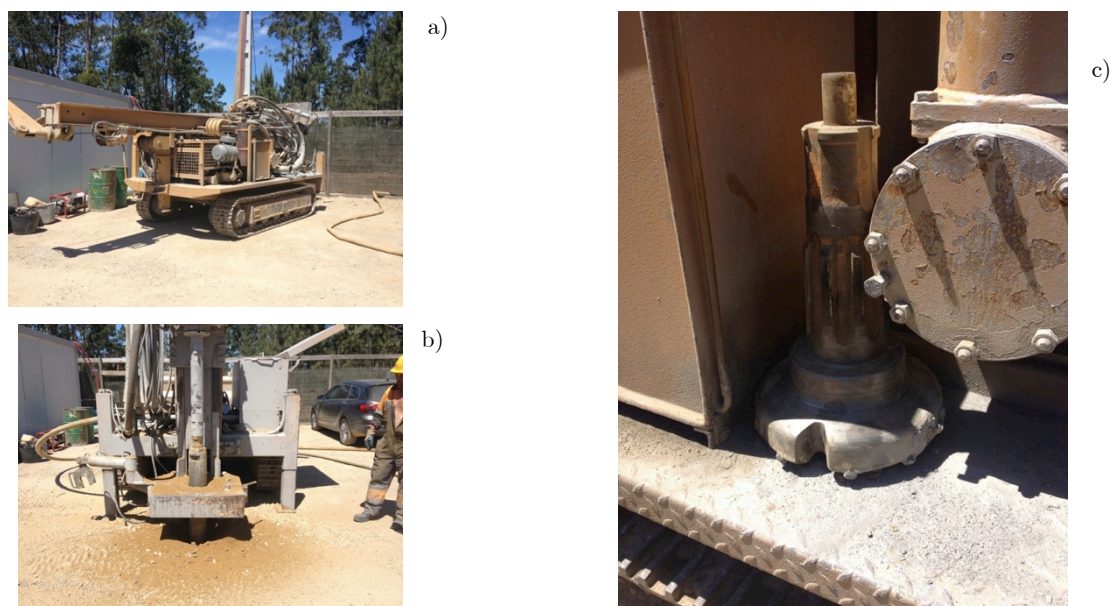


Figura C.4 - Perfuração por rotopercussão: a) equipamento de perfuração; b) perfuração; c) martelo de fundo de furo

O processo de execução dos piezômetros inicia-se com a execução de um furo de pesquisa. Este furo inicial, é normalmente de diâmetro mais reduzido e tem como finalidade verificar a veracidade das informações prestadas pelo estudo hidrogeológico elaborado posteriormente. O furo de pesquisa assume particular importância em perfurações destinadas à captação de águas, devendo a sua execução garantir o descrito no Decreto-Lei n.º 226A/2007 de 31 de maio.

A principal preocupação na execução da perfuração é a garantia da verticalidade da mesma, que é condicionada pelas características das formações geológicas, como fissuração, carsificação ou inclinação das camadas, e pela aplicação de cargas incorretas às ferramentas de corte, dependendo também do método de perfuração utilizado. Perturbações na verticalidade podem dificultar a colocação do maciço filtrante abaixo de possíveis pontos de inflexão.

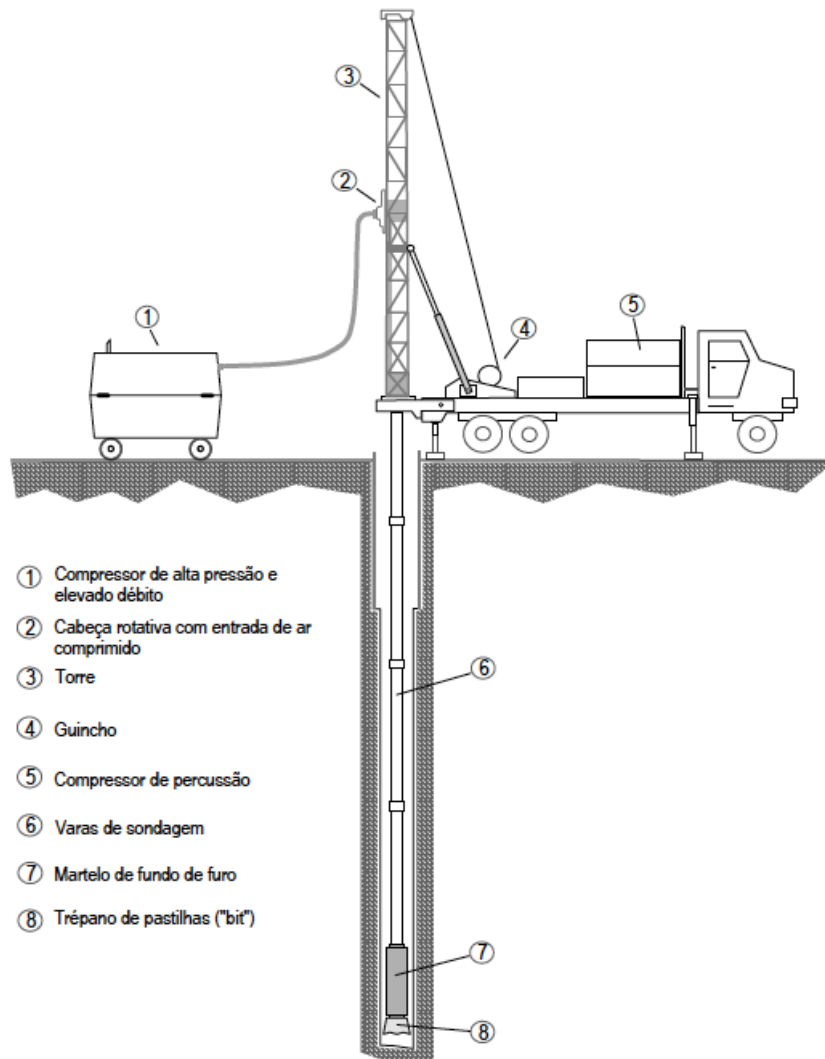


Figura C.5 - Esquema de método de perfuração por rotopercurssão

Executado o furo de pesquisa até a profundidade desejada, procede-se ao alargamento do mesmo, de forma a permitir um diâmetro suficientemente grande que permita a colocação da tubagem e o revestimento das paredes do furo.

Após o alargamento, procede-se à colocação da tubagem. Esta tubagem tem como objetivo evitar o colapso das paredes da perfuração e isolar os níveis a que se pretende ter acesso.

Para o caso de estudo, foi definida uma tubagem em PEAD, de classe de resistência PN10, com diâmetro de 180 mm, esta cega nos primeiros 10 e 1m da perfuração para piezómetros de controlo de profundidade e superficial respetivamente. Os restantes troços dos piezómetros são constituídos por tubagem similar, sendo no entanto esta ranhurada horizontalmente (tubo ralo) a 360°. A dimensão das aberturas dos tubos ralo foram escolhidas tendo em consideração a granulometria do material onde se efetua a perfuração

e a granulometria do material a aplicar no revestimento a colocar entre a tubagem e as paredes do furo.

Os troços de tubo ralo foram envoltos em geotêxtil de 300g/m², assumindo este a função de filtro, evitando a passagem de partículas se solo ou constituintes do maciço filtrante para o interior da tubagem. A ligação entre troços de tubagem é garantida através das roscas existentes nas extremidades destas.



Figura C.6 - Tubagem: a) tubagem PEAD cega (cima) e ranhurada (baixo); b) revestimento de tubagem ranhurada com geotêxtil

O passo seguinte é a concepção do maciço filtrante, recorrendo ao preenchimento do espaço sobrance entre a parede da perfuração e a tubagem. A concepção do maciço filtrante tem essencialmente três objetivos, proteger a tubagem, conferir-lhe resistência e evitar a contaminação superficial.

O maciço filtrante executado na zona dos tubos-ralo é constituído por uma areia de granulometria grossa (seixo), com características de esfericidade e arredondamento elevado, se

A colocação do material constituinte do maciço dever ser realizada lentamente e de forma uniforme, de forma a garantir a continuidade da camada evitando assim a criação de zonas de vazios. No caso de estudo a espessura do maciço filtrante varia em função das características do solo e configuração da perfuração, não sendo no entanto nunca inferior a 0,08 m, prolongando-se verticalmente cerca de 0,20 m sobre o troço de tubagem cegando devidamente lavada e calibrada.



Figura C.7 - Material a utilizar na constituição do maciço filtrante

Executado o maciço filtrante, procedeu-se à limpeza do furo com recurso ao método de “air-lift”. Este método consiste na injeção de ar comprimido através de uma coluna de injeção, na zona dos tubos-ralo, expelindo os detritos depositados no furo e o rearranjo da partículas constituintes do maciço filtrante (Figura C.8). A injeção de ar é feita em ciclos de paragem arranque.

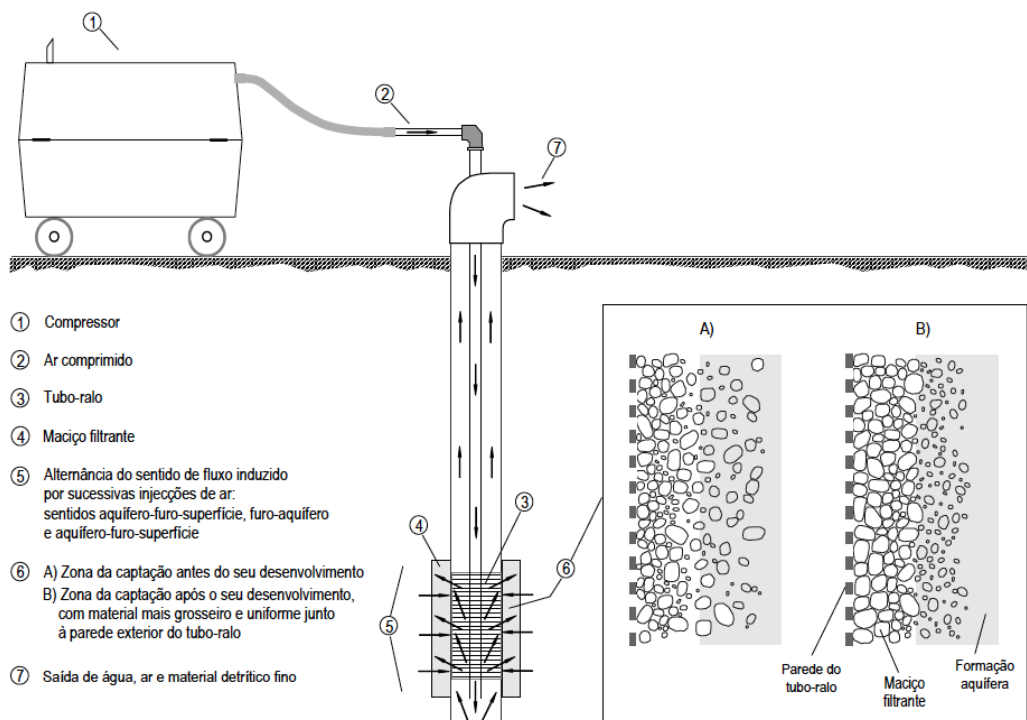


Figura C.8 - Esquema do método de limpeza da perfuração “air-lift”

O maciço filtrante é executado no troço constituídos por tubos-ralo, nos troços constituídos por tubagem cega, é aplicado um isolamento constituído por bentonite. Esta processo visa garantir a impermeabilização dos troço evitando a

interferência/contaminação de águas subterrâneas por águas superficiais, garantindo assim a veracidade das amostras recolhidas.



Figura C.9 –Aspetto do furo após a aplicação da camada constituída por bentonite.

Superiormente a este isolamento é aplicada uma camada constituída por calda de cimento, de forma a garantir a selagem do furo.

Por fim executa-se o maciço de encabeçamento com recurso a anéis de betão armado com diâmetro de $\phi 1000$ mm com 0,50 m de altura preenchidos com betão, e sela-se a tubagem com uma tampa em PEAD com diâmetro $\phi 225$, selada na extremidade superior.



Figura C.10 – Piezómetros: a) piezómetro duplo após realização do maciço de encabeçamento; b) piezómetro simples após realização do maciço de encab

Anexo D – Exemplos de características técnicas dos geossintéticos utilizados

D.1. Geocompósito bentonítico



Products Distributed by Atarfil

Atar bent CS 5500-200

Geosynthetic Clay Liner ATARBENT

Waterproof geocomposite consisting of sodium bentonite between two geotextiles: a base woven geotextile and a top non-woven geotextile. Components are firmly bonded by needlepunching. **ATARBENT** is manufactured under rigorous quality control in order to comply with the most demanding requirements.





Technical Data

FINISHED PRODUCTS			
	Unit	Test Method	Value
Permeability, k	m/s	ASTM D 5887	1 x 10 ⁻¹¹
Tensile Strength (MC/CD)	kN/m	UNE EN ISO 10319	18 / 15
Puncture resist (CBR)	N	UNE EN ISO 12236	3000
Bentonite Mass/Area ⁽¹⁾	g/m ²	UNE EN 14196	5500
GCL Mass/Area	g/m ²	UNE EN 14196	5900
Thickness	mm	UNE EN 964-1	6,5

(1): 15% humidity

RAW MATERIALS			
Geotextiles			
	Unit	Test Method	Value
Nonwoven mass/unit area	g/m ²	ASTM D 5261	200
Woven mass/unit area	g/m ²	ASTM D 5261	200

Bentonite			
	Unit	Test Method	Value
Free swell	ml / 2g	ASTM D 5890	30
Fluid loss	ml	ASTM D 5891	18
Water absorption	%	ASTM E 946	600
Montmorillonite content	%	XRD	>90
Humidity	%	BS1377	<15

Presentation

Length: 40 m

Width: 5 m

Data above mentioned are correct and up-to-date. They do not express or imply guarantee. Rights to modify these data without advanced notice are reserved.

www.atarfil.com



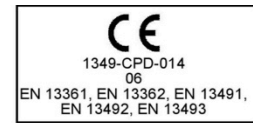

Ctra. Córdoba, Km. 429 - Complejo El Rey
E-18230 Atarfe (Granada) - SPAIN -
+34 902 43 92 00
+34 958 43 91 28

Member of






D.2. Geomembrana



ATARFIL HD

Raw Material High Density Polyethylene

ATARFIL HD is a geomembrane manufactured from maximum quality high density polyethylene HDPE resins, duly contrasted, that comply with the most rigorous requirements established for their use.

ATARFIL HD contains 97,5% of pure polymer, and approximately 2,5% of Carbon Black, antioxidants and thermal stabilizers. The product does not contain plasticizers or fillers that can migrate over time.

The geomembrane **ATARFIL HD** is manufactured under permanent quality controls.

Surface	Smooth	Colour	Black
		RAL Code	-

	Tested Property	Unit	Test Method	Value		Tested Property	Unit	Test Method	Value
Raw Material Identification	Density of Raw Material	g/cm ³	UNE EN ISO 1183-1	≥ 0,932	Functional Properties	Low Temperature Brittleness (T _b : -40°C)	-	UNE EN 495-5	No cracks
	Density of Geomembrane	g/cm ³	UNE EN ISO 1183-1	0,946 ± 0,004		Water Permeability	m ³ /m ² -dia	UNE EN 14150	< 1·10 ⁻⁵
	Melt Flow Index	g/10 min	UNE EN ISO 1133 D Condition (190°C/2,16 Kg)	≤ 0,40		Coefficient of Linear Thermal Expansion	1/°C	ASTM D 696	2,15·10 ⁻⁴
			UNE EN ISO 1133 T Condition (190°C/5 Kg)	≤ 1,30		Water Absorption	%	UNE EN ISO 62 (24h)	≤ 0,1
Carbon Black Content	%	ASTM D 4218	2,0 - 2,5	UNE EN ISO 62 (6 days)				≤ 0,1	
Durability	Oxidative Induction Time (OIT)	min	UNE EN 728 (200°C)	> 100		Thickness of Coextruded Layer	%	UNE EN 1849-2	-
	Stress Crack Resistance/NCTL	h	ASTM D 5397	≥ 400		Asperity Height	mm	ASTM D 7466	-
	Oxidation	%	UNE EN 14575	≤ 15					

	Tested Property	Unit	Test Method	Value					
Strength Characteristics Quality of Final Product	Thickness	mm	UNE EN 1849-2	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	
	Confidence level 95%	%	-	Tolerance: ± 6					
	Confidence level 90%	%	-	Tolerance: ± 4					
	Tensile Properties (*)								
	Tensile strength at Yield	N/mm	UNE-EN ISO 527 (Type V)	18 (16)	27 (24)	36 (32)	45 (40)	54 (48)	
	Elongation at Yield	%		12 (9)					
	Tensile strength at Break	N/mm		32 (26)	48 (39)	64 (52)	80 (65)	96 (78)	
	Elongation at Break	%		800 (700)					
	Tear Resistance	N	ISO 34-1	≥ 140 (135)	≥ 210 (202)	≥ 280 (270)	≥ 350 (337)	≥ 420 (405)	
	Puncture Resistance	KN	UNE-EN ISO 12236	3.0 (2.5)	4.5 (4.0)	5.5 (5.0)	6.5 (6.0)	6.8 (6.5)	
Exploding Resistance	%	pr EN 14151	< 15						
Dimensional Stability	%	UNE EN ISO 14632 (100°C, 1h)	± 1,5						

	Parameter	Units	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00
161210 PRESENTATION (Standard Sizes)	Roll width	m	6 / 6,30	6 / 6,30	6 / 6,30	6 / 6,30	6 / 6,30
	Roll Length	m	210	140	105	84	70
	Surface	m ²	1260 / 1323	840 / 882	630 / 661	504 / 529	420 / 441

(*) Values indicated are MEDIUM. In brackets values with 95% confidence level.

This information is provided for reference purposes and is not intended as guarantee. ATARFIL assumes no liability in connection with the use of this information or the final use of the product.



D.3. Geotêxtil de proteção da geomembrana



GTX NWH



Non-woven, needle punched geotextiles of virgin Polypropylene, mechanically and subsequently thermally treated on the surface, obtaining a continuous filament product with high performance and great resistance.

Technical Data

			100	150	200	250	300	350	400	500	600
Property	Norm	Unit	Value								
PHYSICAL PROPERTIES											
Mass per unit area	EN ISO 9864	g/m ²	100	150	200	250	300	350	400	500	600
Thickness	2kPa EN ISO 9863-1	mm	1.11 (±21.6%)	1.48 (±21.6%)	1.74 (±19.5%)	2.20 (±17.3%)	2.40 (±14.2%)	2.73 (±13.9%)	3.06 (±11.8%)	3.98 (±10.6%)	4.93 (±11.2%)
MECHANICAL PROPERTIES											
Tensile strength	MD EN 10319	kN/m	7.2 (-0.78)	10.92 (-1.13)	15 (-1.5)	18.53 (-3.27)	21.13 (-1.33)	25.20 (-1.66)	27.91 (-1.17)	31.52 (-1.72)	34.90 (-1.82)
	CD EN 10319	kN/m	7.3 (-0.64)	11.61 (-1.08)	15 (-1.97)	17.7 (-3.02)	24.82 (-3.15)	25.60 (-1.73)	31.60 (-4.51)	36.80 (-2.46)	43.70 (-1.99)
Elongation at break	MD EN 10319	%	53 (±6.07)	55 (±7.32)	56 (±6.53)	59 (±6.99)	58 (±6.65)	58 (±6.96)	58 (±6.72)	63 (±6.48)	68 (±6.63)
	CD EN 10319	%	59 (±6.62)	62 (±7.5)	61 (±6.71)	62 (±6.72)	61 (±7.36)	63 (±7.16)	61 (±6.57)	65 (±7.32)	74 (±6.46)
Static Puncture Resistance (CBR)	EN ISO 12236	kN	1.23 (-0.09)	1.95 (-0.20)	2.57 (-0.05)	3.02 (-0.13)	3.93 (-0.30)	4.49 (-0.36)	5.26 (-0.60)	6.49 (-0.43)	6.91 (-0.53)
Resistance to perforation (cone fall)	EN 918	mm	31 (+0.38)	21.10 (+2.00)	15.73 (+0.94)	13.05 (+0.21)	9.80 (+0.99)	7.87 (+0.76)	6.40 (+1.42)	6.20 (+0.94)	5.50 (+0.42)
HYDRAULIC PROPERTIES											
Permeability	EN ISO 11058	l/m ² /s	63.78 (-9.43)	56.0 (-8.00)	31.2 (-4.68)	31.15 (-4.61)	30.95 (-5.05)	26.72 (-4.01)	20.14 (-3.02)	18.96 (-8.00)	17.50 (-2.77)
In-plane flow capacity (*)	EN ISO 12958	10 ⁻⁶ m ² /s	4.49	5.83	6.39	7.26	7.83	8.20	9.00	1.45(**)	1.99(**)
			1.14	1.60	2.02	2.11	2.50	2.58	2.79	4.12	6.18
Porometry O ₉₀	EN ISO 12956	µm	0.20 (±0.03)	0.16 (±0.03)	0.06 (±0.01)	0.06 (±0.01)	0.057 (±0.01)	0.06 (±0.01)	0.06 (±0.01)	0.05 (±0.01)	0.05 (±0.01)
PRESENTATION											
Roll width		m	5.5/2.75	5.5/2.75	5.5/2.75	5.5/2.75	5.5/2.75	5.5/2.75	5.5/2.75	5.5/2.75	5.5/2.75
Roll length		m	100	100	100	95	80	70	60	50	40
Roll diameter		cm	34	45	26	50	52	50	50	48	
Roll weight		Kg	58/29	90/45	112/56	131/66	134/67	137/69	132/66	140/70	134/67

(*) Gradient q20/1.0

Gradient q200/1.0

(**) 10⁻⁵m²/s

06/2011 Los datos arriba indicados son correctos y corresponden a nuestros últimos conocimientos. No implican ni expresan garantía. Se reserva el derecho a modificaciones sin notificación previa.
Data above mentioned are correct and up-to-date. They do not express or imply guarantee. Rights to modify these data without advanced notice are reserved.



Headquarters: Ctra. de Córdoba, Km 429 - Complejo El Rey - E-18230 Atarfe - GRANADA - SPAIN - Tel.: +34 958 439 200 - Fax: +34 958 439 128 - www.atarfil.com

D.4. Geocompósito drenante a utilizar na solução proposta



INTERMAS NETS,S.A.
Ronda de Collsabadell, 11
E-08450 Llinars del Vallès
(Barcelona) SPAIN
TEL. 34-93-842 57 00
FAX 34-93-842 57 01
web: www.intermas.com
e-mail: geo@intermas.com

INTERDRAIN

GMG 620

Geocompuesto drenante

**DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO:**

INTERDRAIN GMG 620 está constituido por una georred tridimensional de Polietileno de alta densidad (PEAD) con 2 geotextiles de Polipropileno (PP) termofijados a la georred. La georred está formada por dos hilos superpuestos que forman canales con alta capacidad de evacuación de agua, incluso colocados horizontalmente y sometidos a grandes cargas.

FUNCIONES: DRENAJE, FILTRACIÓN, ANTICONTAMINATE DE FINOS y PROTECCIÓN en un solo producto.

PRINCIPALES APLICACIONES: Sellados y vasos nuevos de vertederos, balsas, drenaje horizontal de terraplenes y plataformas (carreteras, ferrocarriles, tranvías), muros de contención, estribos de puentes, falsos túneles, sótanos, canales, jardines y campos deportivos.

Características	Valor	Unidad	Normativa
Georred drenante			
Material	Polietileno de alta densidad (PEAD)		
Negro de carbón	1,2 - 2,5	%	ASTM D 1603
Densidad	> 0,94	g / cm ³	ASTM D1505
Espesor a 2 kPa / 200 kPa	6,0 / 5,6	mm	ISO 9863-1
Geotextil filtro			
Material	Polipropileno (PP)		
Masa por unidad de superficie	200	g / m ²	ISO 9864
Punzonamiento dinámico (Caída de cono)	23	mm	ISO 13433
Punzonamiento estático (CBR)	2,5	kN	ISO 12236
Permeabilidad normal al plano	30	l / m ² s	ISO 11058
Apertura de poro O ₉₀	60 - 70	µm	ISO 12956
Geocompuesto drenante			
Masa por unidad de superficie	1.240	g / m ²	ISO 9864
Espesor a 2 kPa / 200 kPa	7,0 / 6,2	mm	ISO 9863-1
Resistencia a la tracción máxima (RT _{MAX}) MD / CD	26 / 23	kN / m	ISO 10319
Elongación a RT _{MAX} , MD / CD	40 / 50	%	ISO 10319
Capacidad drenante en el plano, MD		l / m·s	ISO 12958 ⁽¹⁾
i = 1,0	σ = 20 kPa	1,15	
	σ = 50 kPa	1,00	
	σ = 200 kPa	0,82	
	σ = 400 kPa	0,53	

INTERDRAIN está disponible en rollos de **2 o 4 metros** de ancho.

posee un solape de geotextil en cada lado para facilitar la instalación y evitar la entrada de tierra. deberá cubrirse completamente durante los 14 días siguientes a la instalación.

⁽¹⁾ Valores medios según ISO 12958 con probetas de aluminio de 305 mm x 380 mm. La tolerancia en este ensayo es de +/- 30%.

i : gradiente hidráulico

MD : dirección fabricación (longitudinal)

CD : dirección perpendicular a fabricación (transversal)


σ : presión normal al plano del geosintético

Las especificaciones dadas son valores medios fruto de nuestros conocimientos actuales, revisados y corregidos. **INTERMAS** declina toda responsabilidad derivada de uso en proyectos u obras, y se entrega sólo a título informativo.



Versión Abril 2010

Anexo E – Boletim de ensaios realizado ao solo a utilizar na camada de regularização

	GESTÃO DE OBRA	RAME Nº 152
	APROVAÇÃO DE MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	

Obra: CONSTRUÇÃO DO NOVO ATERRO DO SISTEMA MULTIMUNICIPAL DO SUL DO DOURO - ATERRO DO GESTAL

IDENTIFICAÇÃO DO MATERIAL / EQUIPAMENTO		
MATERIAL / EQUIPAMENTO A APROVAR:		
TOMO 1 – Solo a utilizar na camada de regularização		
<hr/>		
AMOSTRA Nº: 1	ESPECIALIDADE: Movimento de terras	
FORNECEDOR:		
N/A		
DOCUMENTAÇÃO DE SUPORTE: *		
CADERNO DE ENCARGOS / CONDIÇÕES TÉCNICAS ESPECIAIS		
DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA ANEXA:		
Caracterização do solo; localização da zona de colheita; fotografia da amostra		
OBSERVAÇÕES:		
N/A		
Assinatura: Telma Ramos		Cargo: Directora de obra adjunta
		Data: 28.04.2014

ENVIO À FISCALIZAÇÃO/DONO DE OBRA			
EM:	RECEBIDO POR:	CARGO:	ASS.:

ACEITAÇÃO OU REJEIÇÃO			
ACEITE S/ RESTRIÇÕES	<input type="checkbox"/>	ACEITE C/ RESTRIÇÕES	<input type="checkbox"/>
		REJEITADO	<input type="checkbox"/>
JUSTIFICAÇÃO:			
Assinatura:		Cargo:	Data:

* Caderno de Encargos, Condições Técnicas Especiais ou de outra documentação

RECEBIDO PELO ADJUDICATÁRIO			
DATA:	RECEBIDO POR:	CARGO:	ASS.:



Determinação do Limite de Liquidez/Plasticidade NP 143

Características da amostra/ensaio

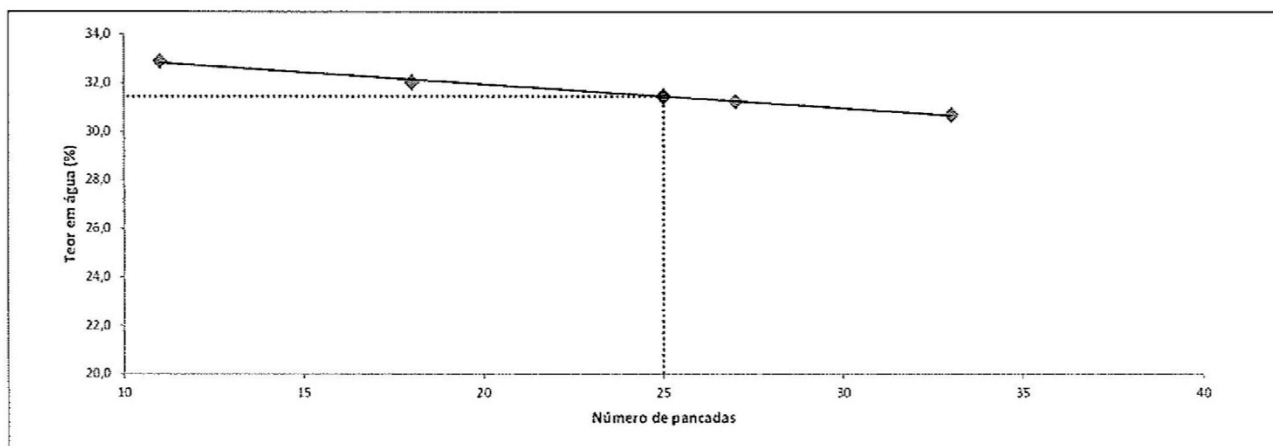
Referência/Número da amostra	045/14, Amostra 48
Obra	SULDOURO, Novo Aterro Sanitário – Aterro do Gestal
Local da amostragem	Solo cinzento britado
Data da amostragem	17/04/2014
Data de ensaio	23/04/2014

Determinação Limite de Plasticidade

Identificação do provete		1	2	3	4
m ₁ - Massa do recipiente	(g)	9,43	9,49	9,30	9,45
m ₂ - Massa do recipiente e do provete antes da secagem	(g)	11,59	11,89	11,90	12,69
m ₃ - Massa do recipiente e do provete seco	(g)	11,14	11,38	11,36	11,98
W _p - Teor em água do provete = $((m_2 - m_3)/(m_3 - m_1)) * 100$	(%)	26,3	27,0	26,2	28,1
LP - Limite de Plasticidade	(%)	27			

Determinação Limite de Liquidez

Identificação do provete		1	2	3	4
Número de pancadas		33	27	18	11
m ₁ - Massa do recipiente	(g)	17,06	17,06	17,15	17,20
m ₂ - Massa do recipiente e do provete antes da secagem	(g)	28,09	28,11	31,66	31,74
m ₃ - Massa do recipiente e do provete seco	(g)	25,50	25,48	28,14	28,14
W _L - Teor em água do provete = $((m_2 - m_3)/(m_3 - m_1)) * 100$	(%)	30,7	31,2	32,0	32,9
LL - Limite de Liquidez	(%)	31			



Observações

Ensaio:

Responsável:

 Roberto Eirinha (Técnico de Laboratório)	 Mafalda Rodrigues (Responsável de Laboratório)
--	--



Atenas
 Centro de Estudos e Obras Públicas - Engenharia e Arquitetura
 Município de Espinheiro e Vila Verde
 Conceção, Equipamento e Fabricação de Fábrica de Alvenaria e
 do Sistema de Muros, Mosaicos e Montagem em Gesso
 ASSITE
 Certificado nº 10001/00001
 SISTEMA GESTÃO DE QUALIDADE
 ISO 9001:2008



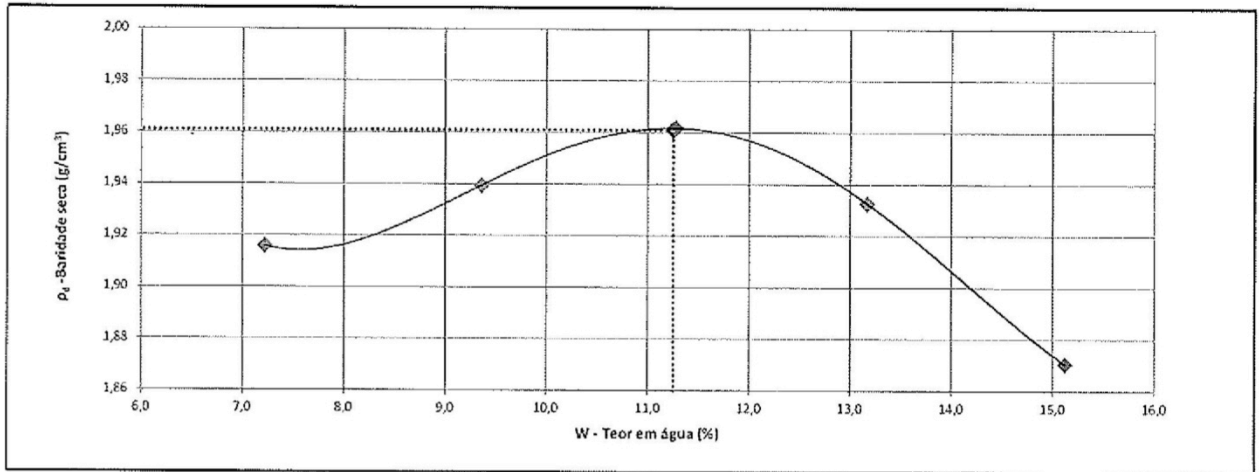
**Ensaio de Compactação
LNEC E197**

Características da amostra/ensaio

Referência/Número da amostra	045/14 , Amostra 48
Obra	SULDOURO, Novo Aterro Sanitário – Aterro do Gestal
Local da amostragem	Solo cinzento britado
Data da amostragem	17/04/2014
Data de ensaio	23/04/2014

Proctor Modificado em Molde Grande


m_m - Massa do molde (g)	5017,5	5017,5	5017,5	5017,5	5017,5
m_{msh} - Massa do molde e solo húmido (g)	9403,5	9531,0	9265,0	9540,0	9470,0
m_{sh} - Massa solo húmido = $m_{msh} - m_m$ (g)	4386,0	4513,5	4247,5	4522,5	4452,5
V - Volume do molde (cm ³)	2067,7	2067,7	2067,7	2067,7	2067,7
ρ_w - Baridade húmida = m_{sh}/V (g/cm ³)	2,12	2,18	2,05	2,19	2,15
Identificação do recipiente	1	2	3	4	5
m_1 - Massa do recipiente (g)	507,0	504,5	510,0	508,5	505,0
m_2 - Massa do recipiente e do provete antes da secagem (g)	4805,0	5029,5	4705,0	5024,5	4875,0
m_3 - Massa do recipiente e do provete seco (g)	4437,0	4571,0	4422,5	4499,0	4301,0
W - Teor em água do provete = $((m_2 - m_3)/(m_3 - m_1)) * 100$ (%)	9,4	11,3	7,2	13,2	15,1
ρ_d - Baridade seca = $(\rho_w / (100 + W)) * 100$ (g/cm ³)	1,94	1,96	1,92	1,93	1,87




Resultados

$\rho_{d\ max}$ - Baridade seca máxima (g/cm ³)	1,96
W_{opt} - Teor em água óptimo (%)	11,3

Observações

Ensaiou: 
 Roberto Eirinha
 (Técnico de laboratório)

Responsável: 
 Mafalda Rodrigues
 (Responsável de Laboratório)



Associação para o Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Ciências Exactas e Naturais
 Instituto de Engenharia e Tecnologia
 Engenharia e Tecnologia de Materiais e Construção
 Engenharia de Materiais, Metalurgia e Materiais em Óxido
 APCT
 Estrada nº 2690, 2690-005
 4510-014, ESTRELA DA BARRAGEM
 28121, 194 2021, 2002

Resumo de Ensaios Realizados Solos

Características da amostra/ensaio

Referência/Número da amostra	045/14 , Amostra 48
Obra	SULDOURO, Novo Aterro Sanitário – Aterro do Gestal
Local da amostragem	Solo cinzento britado
Data da amostragem	17/04/2014
Data de ensaio	


Ensaios realizados

Ensaio	Procedimento Usado	Resultados			Unid.
Análise Granulométrica	LNEC E239	75,0	(mm)	100,0	(%)
		19,0	(mm)	100,0	(%)
		4,75	(mm)	85,5	(%)
		2,0	(mm)	67,0	(%)
		0,425	(mm)	53,2	(%)
		0,075	(mm)	41,0	(%)
Teor em água	NP 84	---			(%)
Equivalente de Areia	LNEC E199	41			(%)
Limite de Liquidez	NP 143	31			(%)
Limite de Plasticidade		27			(%)
Índice de plasticidade		5			(%)
Ensaio de Compactação	LNEC E197	P _{d máx}	1,96		(g/cm ³)
		W _{opt}	11,3		(%)
Ensaio de Compactação com correcção	LNEC E197/AASHTO T224	P _{d máxC}	---		(g/cm ³)
		W _{optC}	---		(%)
Determinação do CBR 95% de comp. relativa	LNEC E198	Valor CBR	---		(%)
		Expansibilidade	---		(%)
Densidade das partículas	NP 83	---			(g/cm ³)
Massa volúmica das partículas secas e absorção de água	NP 581	---			(g/cm ³)
		---			(%)
Quantidade orgânica	JAE S9-53	---			(%)
Classificação Unificada	ASTM D2487	SM - Areia siltosa			---
Classificação para fins rodoviários	LNEC E240	A-4 (1)			---

Observações

Amostragem efectuada pelo Laboratório DST

Responsável:

 Mafalda Rodrigues (Responsável de Laboratório)



Análise:
 Caracterização de Areias Finas, Areias Médias, Areias Grossas, Areias Muito Grossas,
 Manuseamento de Equipamentos e Materiais,
 Construção, Dimensionamento e Estimação de Preços de Obras e
 Contratos de Obras - Manutenção e Montagem de Obras
 de Estrutura
 Registo em 15/07/2007 (CER) -
 SISTEMA PORTUGUÊS DE QUALIDADE
 Nº 01.199.0001.0001

Classificação de Solos LNEC E240 / ASTM D2487

Características da amostra/ensaio

Referência/Número da amostra	045/14 , Amostra 48
Obra	SULDOURO, Novo Aterro Sanitário – Aterro do Gestal
Local da amostragem	Solo cinzento britado
Data da amostragem	17/04/2014
Data de ensaio	23/04/2014

Análise Granulométrica

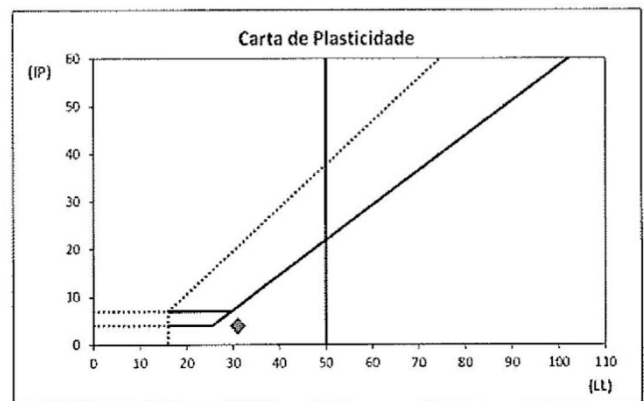
Peneiro	(mm)	75,0	4,75	2,0	0,425	0,075
Percentagem acumulada passada	(%)	100,0	85,5	67,0	53,2	41,0
Percentagem acumulada retida	(%)	0,0	14,5	33,0	46,8	59,0

Material passado no peneiro 75,0mm

Coef. Uniformidade	—
Coef. Curvatura	—
% cascalho	14,5
% areia	44,6
% silte e argila	41,0

Límites de Consistência

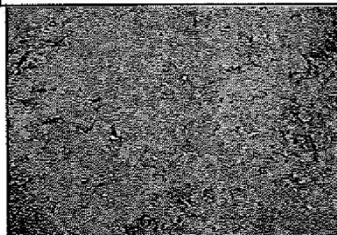
Límite de liquidez	31
Límite de plasticidade	27
Índice de Plasticidade	4




Classificação do solo

Classificação Unificada (ASTM D2487)	SM - Areia siltosa
Classificação para fins rodoviários (LNEC E240)	A-4 (1)


Observações



Ensaiou:


Roberto Eirinha
(Técnico de Laboratório)

Responsável:


Mafalda Rodrigues
(Responsável de laboratório)



Associação Portuguesa de Controladores
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Condição de Uso e Outras Especificações: Escopo, Especificações
Membros do Equipamento e Instalações
Condições de Manutenção e Emissão de Documentos, Modos e
Balanças de Medição, Trabalho e Manutenção de
APCER
Cadastrada e nº 2003/2004
SISTEMA PORTUGUÊS DE QUALIDADE
Nº 113/14/2007/2084

Análise granulométrica por peneiração húmida

LNEC E239

Características da amostra/ensaio

Referência/Número da amostra	045/14 , Amostra 48
Obra	SULDOURO, Novo Aterro Sanitário – Aterro do Gestal
Local da amostragem	Solo cinzento britado
Data da amostragem	17/04/2014
Data de ensaio	23/04/2014

Características da amostra a ensalar

m_{10} - Massa total da fracção retida no peneiro 2,00 mm	(g)	3823,91
m'_{10} - Massa total da fracção passada no peneiro 2,00 mm	(g)	7765,29
m_t - Massa total da amostra = $m_{10} + m'_{10}$	(g)	11589,20
N'_{10} - Percentagem total de material grosso = $(m_{10}/m_t) * 100$	(%)	33,0

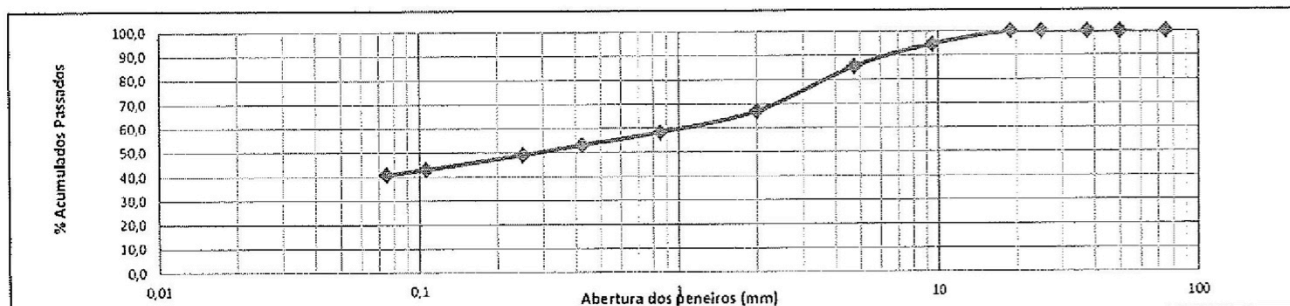
Análise Granulométrica: fracção retida peneiro 2,00 mm

Abertura peneiros (mm)	Massa retida m_x (g)	% Retida $N_x = (m_x/m_t) * 100$ (%)	% Retida acumulada N'_x (%)	% Acumulada passada $N''_x = 100 - N'_x$ (%)
75,0	0,00	0,0	0,0	100,0
50,0	0,00	0,0	0,0	100,0
37,5	0,00	0,0	0,0	100,0
25,0	0,00	0,0	0,0	100,0
19,0	0,00	0,0	0,0	100,0
9,5	625,30	5,4	5,4	94,6
4,75	1050,20	9,1	14,5	85,5
2,0	2148,41	18,5	33,0	67,0

Análise Granulométrica: fracção passada peneiro 2,00 mm



m_a - Massa de material fino utilizado	(g)	163,60
N''_{10} - Percentagem total de material fino = $(m'_{10}/m_t) * 100$	(%)	67,0

Abertura peneiros (mm)	Massa retida m_x (g)	% Retida $N_x = (m_x/m_a) * N''_{10}$ (%)	% Retida acumulada N'_x (%)	% Acumulada passada $N''_x = 100 - N'_x$ (%)
0,850	21,13	8,7	41,6	58,4
0,425	12,67	5,2	46,8	53,2
0,250	10,19	4,2	51,0	49,0
0,106	14,38	5,9	56,9	43,1
0,075	5,20	2,1	59,0	41,0



Ensaio:

Responsável:

 Roberto Eirinha (Técnico de Laboratório)	 Mafalda Rodrigues (Responsável de Laboratório)
---	---



Alameda
 Direcção-Geral de Equipamentos e Materiais
 Ministério do Equipamento e Materiais
 Direcção de Desenvolvimento e Gestão de Produtos de Madeira e
 Direcção de Gestão de Equipamentos e Materiais
 APCR
 Certificação nº 2007 LNEC/2004
 SISTEMA PORTUGUÊS DE QUALIDADE
 Nº 13/14/0001/2004

Emissão: 24/04/2014

Pág. 1 de 1

Características da amostra/ensaio

Referência/número da amostra	045/14 , Amostra 48
Obra	SULDOURO, Novo Aterro Sanitário – Aterro do Gestal
Local da amostragem	Solo cinzento britado
Data da amostragem	17/04/2014
Data de ensaio	23/04/2014

Determinação teor em água

m_1 - Massa do recipiente	(g)	368,6
m_2 - Massa do recipiente e do provete antes da secagem	(g)	761,2
m_3 - Massa do recipiente e do provete seco	(g)	760,7
W_a - Teor em água do provete = $((m_2 - m_3)/(m_3 - m_1)) * 100$	(%)	0,1


Determinação do equivalente areia

Identificação do provete		1	2
M_{prov} - Massa do provete = $120 * ((100 + W_a) / 100)$	(g)	120,1	120,1
K - Constante K do aparelho	(mm)	90	90
h_1 - Altura do nível superior do floculado em relação ao fundo da proveta	(mm)	148	150
h_3 - Distância entre a face superior da peça gula e a face inferior do peso	(mm)	152	151
h_2 - Altura do sedimento determinada com auxílio do pistão = $h_3 - K$	(mm)	62	61
EA - Equivalente de areia do provete = $(h_2/h_1) * 100$	(%)	41,9	40,7
$EA_{Média}$ - Equivalente de areia	(%)	41	


Observações

--

Ensaio:

 Pedro Guimarães (Técnico de Laboratório)

Responsável:

 Mafalda Rodrigues (Responsável de Laboratório)



Anexo
 Construção Civil e Obras Públicas, Ensaios Laboratoriais
 Transição do Equipamento e Materiais
 Direcção, Desenvolvimento e Factor de Produção de Materiais e
 Recursos de Materiais, Materiais e Materiais em Geral
 ANEXOS
 CEN 12518-1:2006 EPT 199
 SISTEMA PORTUGUÊS DE QUALIDADE
 ISO 9001:2008

Anexo F – Localização do ponto de recolha da amostra de solo

