

Laboratorio de
Geotecnia

CEDEX

VERTEDEROS

Componentes, Estabilidad, Patología

Madrid, Mayo 2025

María Santana y José Estaire



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES
Y MOVILIDAD SOSTENIBLE

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

1) Introducción

- a) ¿Qué son?
- b) Relación con Economía Circular

2) Legislación sobre vertederos

- a) Directivas Europeas
- b) Ley de residuos y RD

3) Vertedero como estructura geotécnica

- a) Diques de cierre
- b) Masa de residuos
- c) Sistema de cobertura
- d) Sistema de confinamiento basal

4) Geosintéticos en vertederos

- a) Tipos y funciones
- b) Uso en cobertura final
- c) Uso en confinamiento basal

5) Estabilidad en vertederos

- a) Tipología de roturas
- b) Factores desencadenantes
- c) Cómo calcular la estabilidad

6) Control y vigilancia – Explotación y clausura

7) Patologías

- a) Superficie de apoyo
- b) Sistema de cobertura
- c) Geosintéticos
- d) Asientos y desplazamientos diferenciales
- e) Vía de acceso

8) Conclusiones

I-INTRODUCCIÓN

- **¿Qué es un vertedero?**

1) RAE (2º): Lugar donde se vierten basuras o escombros

2) MITECO: Es una **instalación de tratamiento de residuos** autorizada para la eliminación de residuos que ha de reunir unas determinadas **condiciones de diseño y seguridad**, además de contar con diversos elementos de **vigilancia y control** con el fin de evitar y prevenir, en la medida de lo posible, los riesgos para el medio ambiente y la salud humana.



I-INTRODUCCIÓN

- **Basureros, Vertederos Incontrolados - Ilegales**

- Solución prohibida en la UE:
 - graves problemas de contaminación del terreno y aguas superficiales y subterráneas.
- Práctica eliminada en determinados países.
- Situación variable según el país.
- En España: Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008 – 2015, seguido de planes regionales: objetivo de eliminar por completo el vertido ilegal y tener planes de Gestión de Residuos

El Confidencial

Por E.P.

10/06/2022 - 05:00

EN LOS 24 MUNICIPIOS

Objetivo:
Evitar esto...

"Un problema fuera de control": detectan 672 vertederos ilegales en Madrid

Ecologistas en Acción ha contabilizado cientos de puntos de vertido repletos de escombros, enseres, amianto, residuos industriales, neumáticos y coches abandonados o calcinados



I-INTRODUCCIÓN- Marco legal

Economía circular



2008/98/CE-Directiva Marco de Residuos

Prevención – Reutilización – Reciclado – Valorización – Eliminación



Ley 10/1998

Ley 22/2011 → Ley 7/2022 de Residuos y Suelos Contaminados

para una Economía Circular: fin de la condición de residuo, separación fracciones (julio 2022), demolición selectiva (enero 2024)



I-INTRODUCCIÓN- Marco legal

Marco político y legislativo



Ley 7/2022 de Residuos y Suelos Contaminados para una Economía Circular

- Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos

PLAN ESTATAL MARCO DE
GESTIÓN DE RESIDUOS
(PEMAR)

2016-2022

0. Índice
1. Introducción.
2. Orientaciones comunitarias de la política de residuos.
3. Novedades de la ley 22/2011, de residuos.
4. Descripción general de la gestión de residuos en los últimos años.
5. Estructura de los planes autorizados para el cumplimiento de los objetivos.
6. Residuos domésticos y comerciales
7. Envases y residuos de envases
8. Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos
9. Vehículos al final de su vida útil
10. Neumáticos al final de su vida útil (neumáticos fuera de uso)
11. Aceites usados
12. Piles y baterías
13. Residuos de construcción y demolición
14. Lodos de depuración de aguas residuales
15. PCB's y PCT's
16. Residuos agrarios
17. Residuos de industrias extractivas
18. Residuos industriales (sin legislación específica)
19. Buques y embarcaciones al final de su vida útil
20. Residuos sanitarios
21. Depósito de residuos en vertederos
22. Importaciones/exportaciones de residuos
23. Suelos contaminados
24. Seguimiento y actualización del Plan
25. Financiación

- Reutilización, reciclado, valorización del 70% RCD
- Proyecto Construcción: uso 5%

- Estrategia Española de Economía Circular (Agenda 2030)



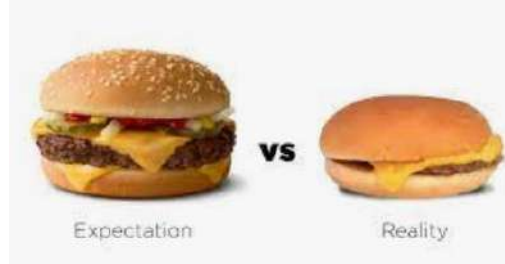
- Reducción 30% consumo materiales
- Reducción 15% generación residuos

- I Plan de Acción de Economía Circular



Eje de actuación: “**Materias primas secundarias**”: garantizar la protección del medio ambiente y la salud humana reduciendo el uso de recursos naturales no renovables y reincorporando en el ciclo de producción los materiales contenidos en los residuos como materias primas secundarias.

I-INTRODUCCIÓN



➤ Limitaciones del reciclaje:

un porcentaje importante de residuos sólidos no se consigue reciclar

➤ Limitaciones de la incineración:

inviable para una amplia variedad de residuos sólidos:

- productos incombustibles,
- problemas de contaminación atmosférica,
- origina nuevos residuos: cenizas, que han de ir a vertedero.

➤ Existencia de nuevos tipos de residuos sólidos:

- de procedencia animal, material sanitario...
- resultantes de nuevos avances tecnológicos.

I-INTRODUCCIÓN

➤ Ventajas de los vertederos controlados:

- **maximizar** la cantidad de residuos almacenados por unidad de área;
- **aislar** los residuos del medio ambiente circundante:
 - Garantía de seguridad ambiental;
 - Garantía de seguridad estructural.
- crear condiciones para que al final del período de servicio el terreno ocupado por el vertedero tenga alguna **utilidad**.



2-Legislación España - RD 646/2020

Directiva 1999/31/CE – Vertido de Residuos:

- Eliminación de residuos en Vertedero (nada de tirarlos por ahí...)
- Clasificación de los vertederos en 3 tipos
- Obligación de gestionar los vertederos tras su clausura
- Imposición de tasas por depósito en vertedero



Decisión 2003/33/CE:

- Tratamiento del residuo antes de depositarlo en vertedero

RD 646/2020 de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.



Algunas leyes del "paisito"



PODER EJECUTIVO
CONSEJO DE MINISTROS

1

Ley 19.829

Díctanse normas para la gestión integral de residuos.

Diario Oficial | N° 28.744 - junio 27 de 2013

ingresen a tales instituciones un total de ciento cincuenta empleados del Banco Banes Uruguay S.A.

JOSÉ MUJICA, Presidente de la República; NELSON LOUSTAUNAU; ALEJANDRO ANTONELLI.

MINISTERIO DE VIVIENDA, ORDENAMIENTO
TERRITORIAL Y MEDIO AMBIENTE

10

Decreto 182/013

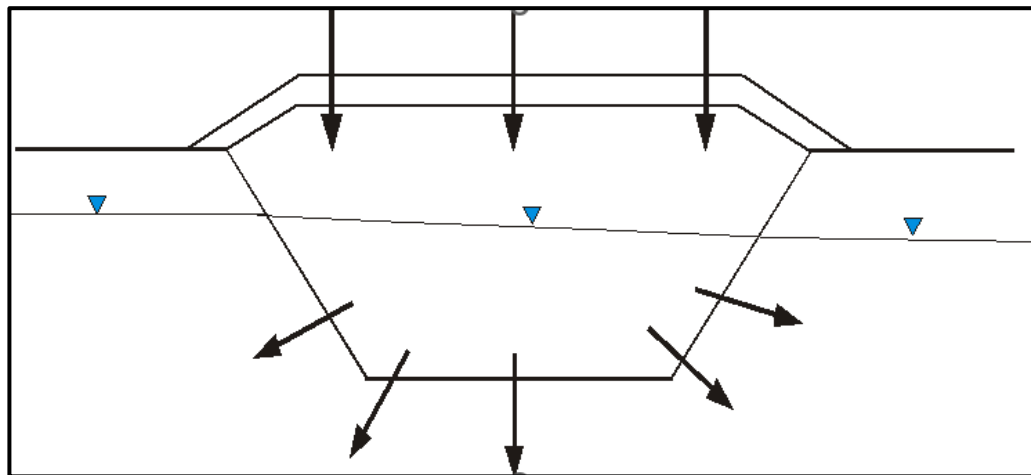
Reglaméntase la gestión de los residuos sólidos industriales y asimilados.

(1.070*P)

DOCUMENTO BASE PARA LA ELABORACIÓN DE

GUÍA Y PAUTAS TÉCNICAS PARA LOCALIZACIÓN, DISEÑO,
CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y CLAUSURA DE RELLENOS
SANITARIOS DE RESIDUOS SÓLIDOS¹

2-Legislación España - RD 646/2020

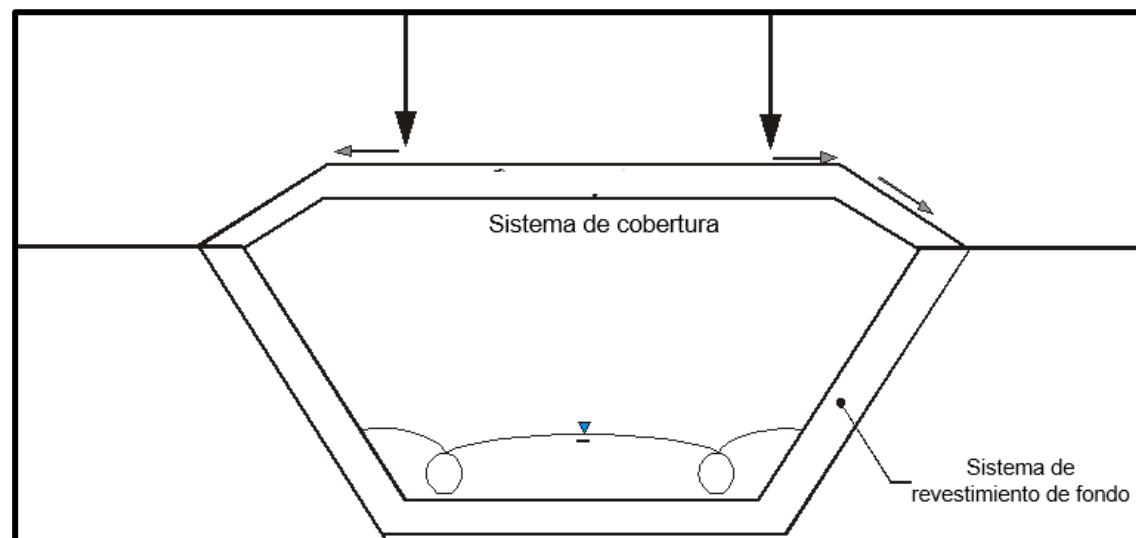


Vertederos antiguos, no controlados:

Requisitos: que no hubiera resurgencia de lixiviados en la superficie

Principio: atenuación natural de lixiviados por circulación en el terreno

2-Legislación España - RD 646/2020



Vertederos controlados:

Requisitos: sistemas de revestimiento de fondo y de cobertura

Principio: evitar que los lixiviados pasen al terreno

2-Legislación España - RD 646/2020

- Tipología de Vertederos:

- Vertedero para Residuos Inertes: No Peligrosos, No experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas;
- Vertedero para Residuos No Peligrosos: residuos sólidos urbanos (RSU) e industriales banales (generados en domicilios, comercios, oficinas y servicios);
- Vertedero para Residuos Peligrosos: por composición química del residuo y de sus lixiviados.



Residuos Peligrosos

Código	Característica
Peligros físicos	
HP 1	Explosivo
HP 2	Comburente
HP 3	Inflamable
HP 15	Residuos que pueden presentar una de las características de peligrosidad mencionadas que el residuo original no presentaba directamente
Peligros para la salud humana	
HP 4	Irritante — Irritación cutánea y lesiones oculares
HP 5	Toxicidad específica en determinados órganos/Toxicidad por aspiración
HP 6	Toxicidad aguda
HP 7	Carcinógeno
HP 8	Corrosivo
HP 9	Infeccioso
HP 10	Tóxico para la reproducción
HP 11	Mutágeno
HP 12	Liberación de un gas de toxicidad aguda
HP 13	Sensibilizante
Peligros para el medio ambiente	
HP 14	Ecotóxico

Tabla 1. Clasificación de las características de peligrosidad definidas en el Reglamento (UE) n° 1357/2014 en función de la naturaleza del peligro



Categoría I

- a) Sean inflamables, corrosivos o reactivos.
- b) Contengan una o más sustancias, según porcentajes que se establecen en peso en la siguiente tabla (Tabla 1):

Tabla 1	
Sustancia	Concentración total
Carcinogénicas	≥ 0.1%
Mutagénicas	≥ 0.1%
Muy tóxicas	≥0.1%
Tóxicas	≥ 3%
Tóxicas para la reproducción	≥ 0,5%
Nocivas	≥ 25%
Irritantes	≥ 10%

- c) Presenten un riesgo biológico especial, por contener o ser pasibles de contener agentes patógenos y no convencionales, que puedan poner en riesgo la salud de la población o la sanidad animal o vegetal, declarados como tales por la autoridad competente, siempre que dicha declaración hubiera sido comunicada a la Dirección Nacional de Medio Ambiente y publicada en el Diario Oficial.

- e) Cuando por aplicación del test de lixiviación den como resultado un nivel de ecotoxicidad, EC50 < 10%.

Tabla 2	
Parámetro	Límite
Arsénico (As)	1 mg/I
Bario (Ba)	70 mg/I
Cadmio (Cd)	0.3 mg/I
Cromo Total (Cr)	5 mg/I
Cromo hexavalente (Cr [VI])	0.1 mg/I
Cobre (Cu)	100 mg/I
Mercurio (Hg)	0.1 mg/I
Molibdeno (Mo)	7 mg/I
Niquel (Ni)	2 mg/I
Plomo (Pb)	1 mg/I
Antimonio (Sb)	0.6 mg/I
Selenio (Se)	1 mg/I
Plata (Ag)	5 mg/I

Categoría II
El resto

2-Legislación España - RD 646/2020

Vertedero para Residuos Inertes

«Residuos inertes»: aquellos residuos no peligrosos que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas. Los residuos inertes no son solubles, ni combustibles, ni biodegradables; ni reaccionan con los materiales con los que entran en contacto ni física, ni químicamente ni de ninguna otra manera, ni afectan negativamente a otras materias con las cuales entran en contacto de forma que puedan dar lugar a la contaminación del medio ambiente o perjudicar la salud humana. Los residuos inertes deben presentar un contenido de contaminantes insignificante y, del mismo modo, el potencial de lixiviación de estos contaminantes así como el carácter ecotóxico de los lixiviados debe ser igualmente insignificante. Los residuos inertes y sus lixiviados no deben suponer un riesgo para la calidad de las aguas superficiales y/o subterráneas.

↓

Ensayos de lixiviación:

- UNE-EN 12457- 4
- UNE-EN 14405

↗

Componentes	L/S=10 l/Kg (mg/Kg de materia seca)	C ₀ (ensayo de percolación) (mg/l)
As	0,5	0,06
Ba	20	4
Cd	0,04	0,02
Cr total	0,5	0,1
Cu	2	0,6
Hg	0,01	0,002
Mo	0,5	0,2
Ni	0,4	0,12
Pb	0,5	0,15
Sb	0,06	0,1
Se	0,1	0,04
Zn	4	1,2
Cloruro	800	460
Fluoruro	10	2,5
Sulfato	1000*	1500
Índice de fenol	1	0,3
COD**	500	160
STD***	4000	***

2-Legislación España - RD 646/2020

Vertedero para Residuos Inertes

Límites de sustancias orgánicas solubles en disolventes orgánicos



Parámetro	Valores límite (mg/Kg de materia seca)
COT (Carbono orgánico total).	30000*
BTEX (Benceno, Etilbenceno, Tolueno y Xilenos).	6
PCB (Policlorobifenilos, 7 congéneres).	1
Aceite mineral (C10 a C40).	500
HAP (Hidrocarburos aromáticos policíclicos, 16 congéneres**).	55

2-Legislación España - RD 646/2020

Vertedero para Residuos No Peligrosos

- Su clasificación se hace por descarte de Residuo Peligroso y Residuo Inerte
- Uso de Código LER (Lista Europea Residuos):
 - * Peligroso
 - No Peligroso

Componentes	L/S=10 l/Kg (mg/Kg de materia seca)	C ₀ (ensayo de percolación) (mg/l)
As	2	0,3
Ba	100	20
Cd	1	0,3
Cr total	10	2,5
Cu	50	30
Hg	0,2	0,03
Mo	10	3,5
Ni	10	3
Pb	10	3
Sb	0,7	0,15
Se	0,5	0,2
Zn	50	15
Cloruro	15000	8500
Fluoruro	150	40
Sulfato	20000	7000
COD*	800	250
STD**	60000	**

Parámetro	Valores límite
COT (Carbono orgánico total).	Máximo 5% sobre materia seca*
pH.	Mínimo 6
CNA (Capacidad de neutralización de ácidos).	**

2-Legislación España - RD 646/2020

Vertedero para Residuos Peligrosos

- Definición de Peligrosidad



Componentes	L/S=10 l/Kg (mg/Kg de materia seca)	C0 (ensayo de percolación) (mg/l)
As	25	3
Ba	300	60
Cd	5	1,7
Cr total	70	15
Cu	100	60
Hg	2	0,3
Mo	30	10
Ni	40	12
Pb	50	15
Sb	5	1
Se	7	3
Zn	200	60
Cloruro	25000	15000
Fluoruro	500	120
Sulfato	50000	17000
COD*	1000	320
STD**	100000	**



Parámetro	Valores límite
LOI (Pérdida de peso por calcinación)*.	Máximo 10% sobre materia seca
COT (Carbono orgánico total).	Máximo 6% sobre materia seca**
CNA (Capacidad de neutralización de ácidos).	***

PICTOGRAMAS DE PELIGRO



HP1 EXPLOSIVO



HP2 COMBURENTE



HP3 INFLAMABLE



HP4 IRRITANTE
HP8 CORROSIVO



HP5 TOXICIDAD ESPECÍFICA
HP7 CARCINOGENO
HP10 TÓXICO PARA LA REPRODUCCIÓN
HP11 MUTÁGENO



HP6 TOXICIDAD AGUDA



HP4 IRRITANTE
HP6 TOXICIDAD AGUDA
HP5 TOXICIDAD ESPECÍFICA
HP13 SENSIBILIZANTE



HP14 ECOTOXICO

2-Legislación España - RD 646/2020

- Los vertederos controlados y el medio ambiente:
 - *Directiva 1999/31/CE*, transpuesta por el Real Decreto 1481/2001. **Se imponen condiciones ambientales** relativas a:
 - Localización
 - Control de aguas y gestión de lixiviados
 - Protección del suelo y de las aguas
 - Impermeabilización de la base y recogida de lixiviados
 - Control de gases
 - Estabilidad
 - *Real Decreto 646/2020, de 7 de julio*, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero:
 - Asegurar protección plena a la salud de las personas y a los recursos naturales.
 - Fomento de las primeras opciones de la jerarquía de residuos y restricción del vertido de residuos.
 - Necesidad de someter los residuos destinados a vertedero a un tratamiento previo adecuado.
 - Régimen de los costes de vertido -Tasas.
 - Obligación de que las instalaciones de vertido sean sometidas a inspección periódica por las autoridades competentes.

2-Legislación España - RD 646/2020

Anexo I –Requisitos generales para todo tipo de Vertederos

- 1) Ubicación: Considerar cercanía a zonas residenciales, aguas, riesgos geológicos o sísmicos, patrimonio. **Necesario informe del IGME**
- 2) Control del agua y gestión de los lixiviados: Evitar su entrada y gestionar lixiviados
- 3) Protección del suelo y del agua

- a) Vertederos para residuos peligrosos: $k \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s y espesor ≥ 5 m.
 - b) Vertederos para residuos no peligrosos: $k \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s y espesor ≥ 1 m.
 - c) Vertederos para residuos inertes: $k \leq 1,0 \times 10^{-7}$ m/s y espesor ≥ 1 m.
- (k = coeficiente de permeabilidad; m/s = metro/segundo).

ó barrera artificial,
espesor $\geq 0,5$ m

Luego se verán más detalles...

- 4) Control de gases: si biodegradable => obligado su aprovechamiento
- 5) Evitar molestias: mal olor, bichos, polvo, ruido...
- 6) Estabilidad

La colocación de los residuos en el vertedero se hará de manera tal que garantice la estabilidad de la masa de residuos y estructuras asociadas, en particular para evitar los deslizamientos. Cuando se instale una barrera artificial, deberá comprobarse que el sustrato geológico, teniendo en cuenta la morfología del vertedero, es suficientemente estable para evitar asentamientos que puedan causar daños a la barrera.



3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

Estructuras geotécnicas complejas:

- **Materiales** variados; materiales poco convencionales
- Componentes con **funciones** muy diversas
- Superposición entre las **fases** de construcción y de servicio



3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

- Componentes

3.0 Dique de cierre-Estructura contención

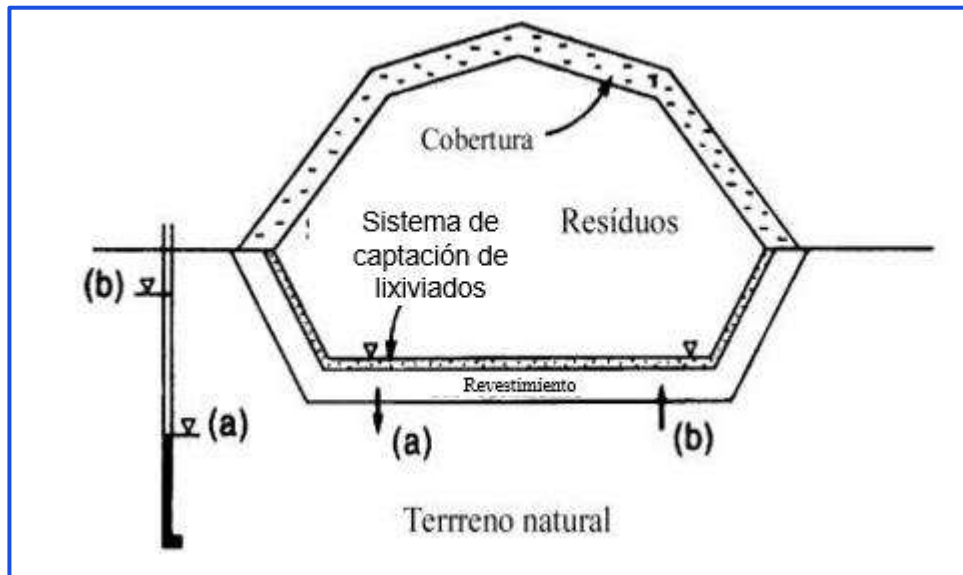
3.1 Masa de residuos

3.2 Sistema de recubrimiento, o cobertura final

3.3 Sistema de confinamiento basal o de fondo

3.4 Sistemas para la captación y control de los lixiviados

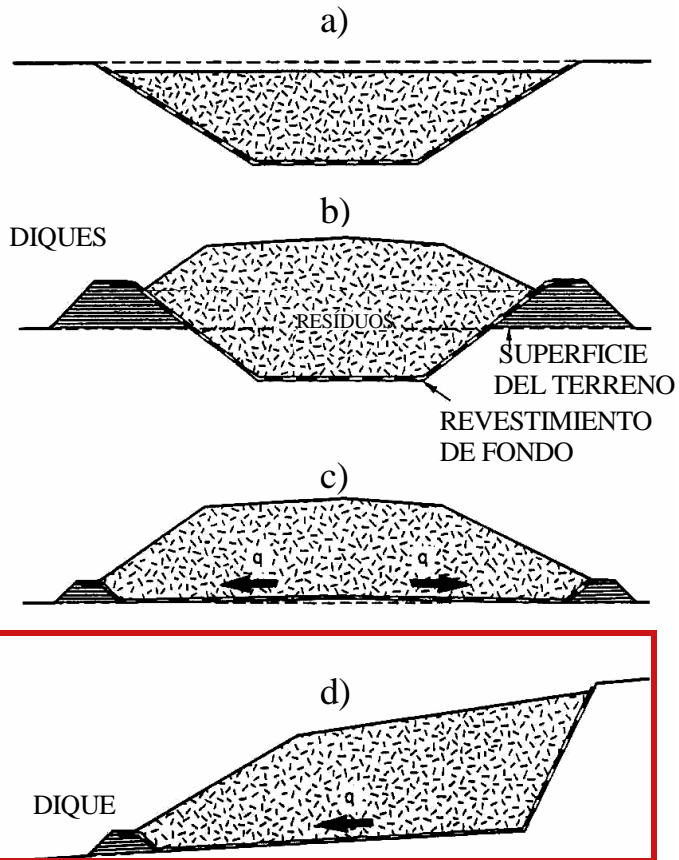
3.5 Sistema para la captación de los gases generados



3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.0 Dique de cierre – Estructura de contención

– Variabilidad de soluciones



Diques perimetrales - Cierre



Diques Cierre



Diques interno-celdas



3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.0 Dique de cierre – Estructura de contención

➤ Funciones de los diques:

- contención perimetral;
- estabilidad para los taludes laterales;
- apoyo estable para el sistema de revestimiento lateral;
- anclaje para el sistemas de revestimiento (geosintéticos)

➤ Deben proyectarse y construirse teniendo en cuenta su funciones estructurales:

- Estabilidad en todas las fases
- Superficie internas: apoyo del revestimiento
- Superficies externas: resistencia a la erosión

3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.0 Dique de cierre – Estructura de contención



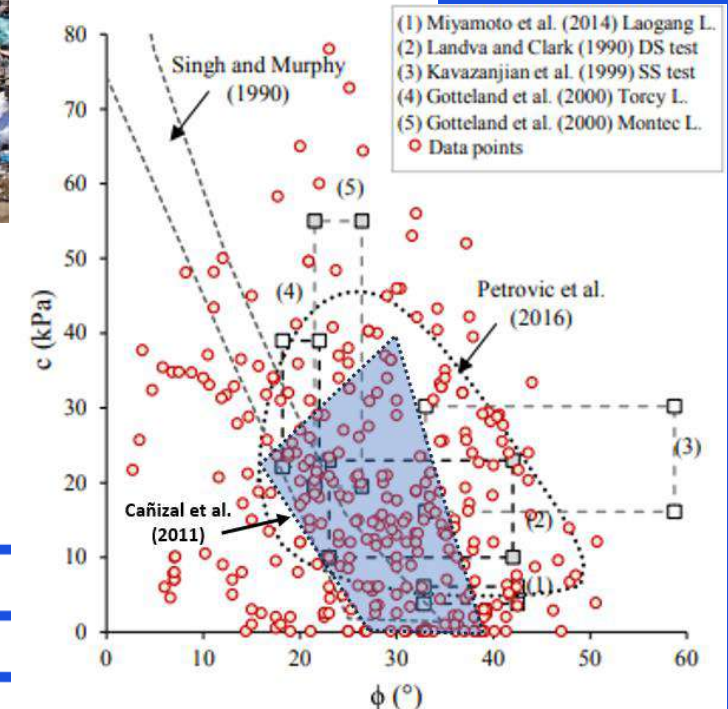
Vertedero de Vapi, India, 2017

3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.1 Masa de residuos

¿Propiedades Geotécnicas?

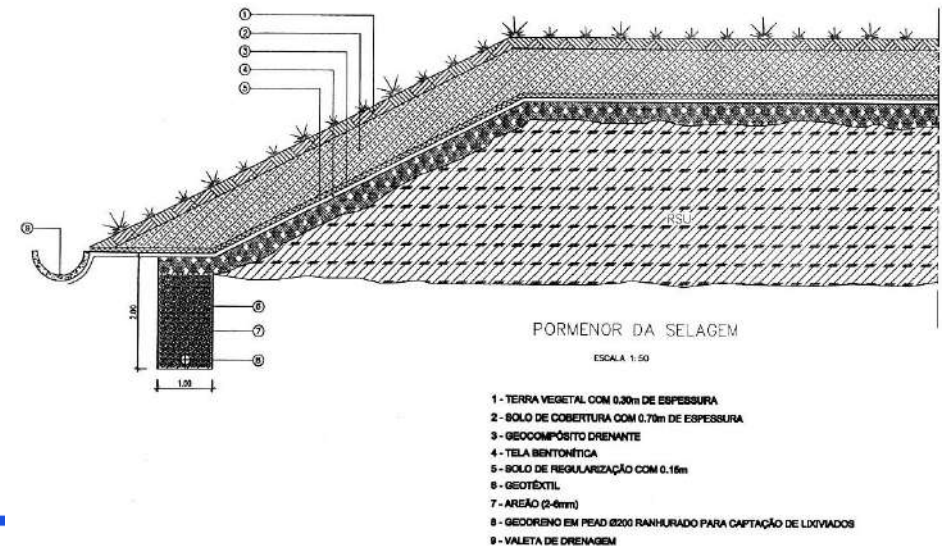
- heterogeneidad:
composición, tratamientos previos,
forma de colocación, edad
- modelos de comportamiento
mecánico:
¿criterio de Mohr-Coulomb?
- dificultades en tomar muestras o
realizar ensayos
- compatibilidad de parámetros, en
deformación, con los otros
materiales



3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.2 Sistema de recubrimiento

- **Objetivos:**
 - controlar la infiltración de las aguas superficiales
 - controlar la producción de lixiviados.
 - contención y protección de los residuos
 - integración paisajística
 - evitar la migración no controlada del **biogás**

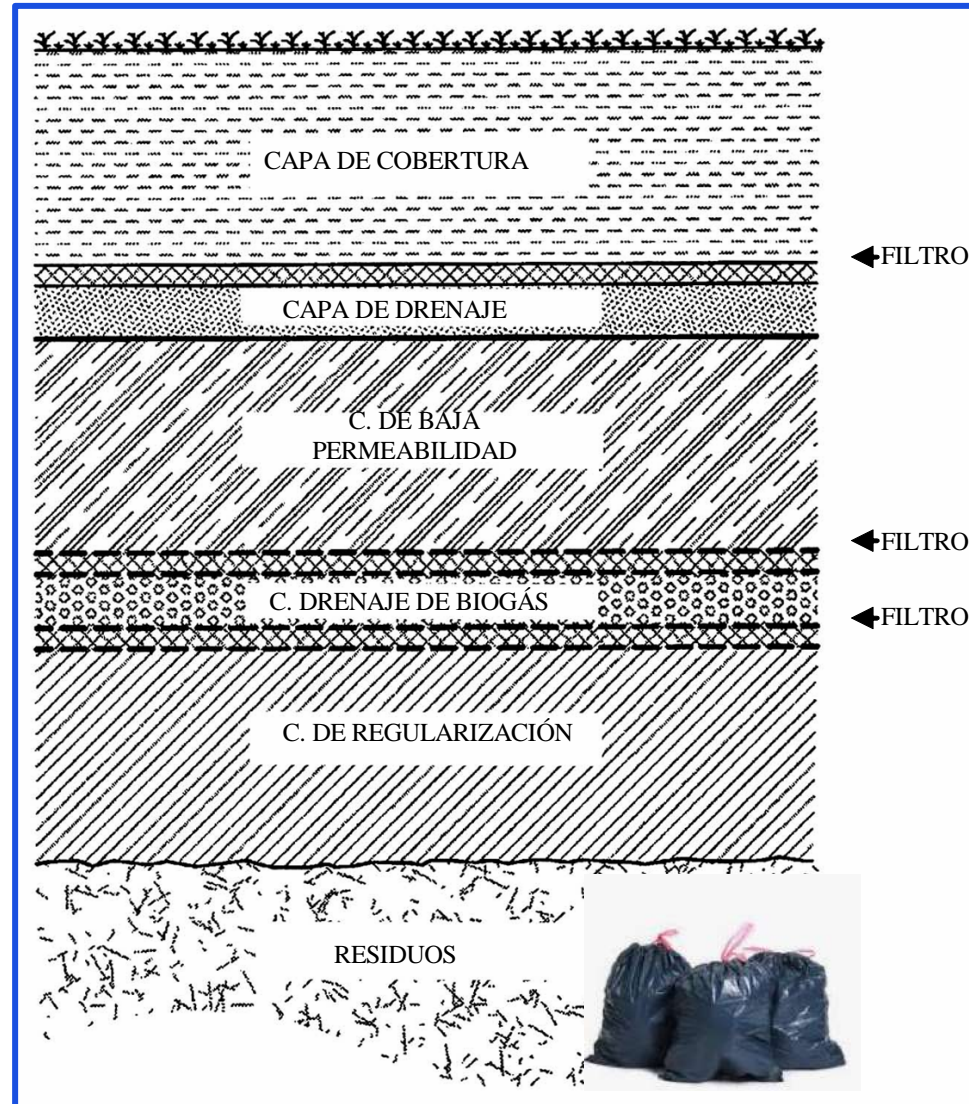


3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.2 Sistema de recubrimiento

- **Componentes del sistema de cobertura:**

- capa de tierras de cobertura
- capa de protección vegetativa
- capa de filtro
- capa de drenaje de agua
- capa de baja permeabilidad
- capa de drenaje de biogás
- capa de regularización



3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.2 Sistema de recubrimiento

➤ Capa de regularización:

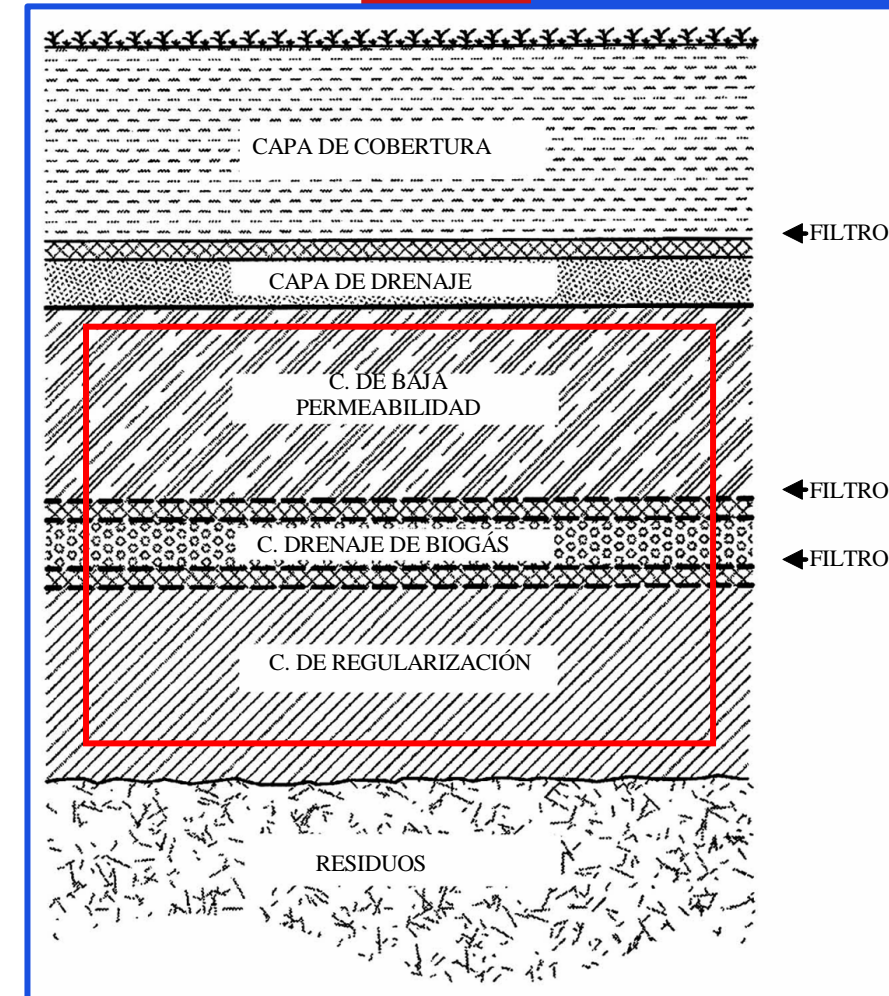
- suelos de granulometría gruesa,
- garantiza la correcta distribución de la carga y deformaciones impuestas por la cobertura.

➤ Capa de drenaje de biogás:

- debe tener permeabilidad y espesor adecuados a la evacuación del biogás.
- capa de arena o geosintético.

➤ Capa de baja permeabilidad:

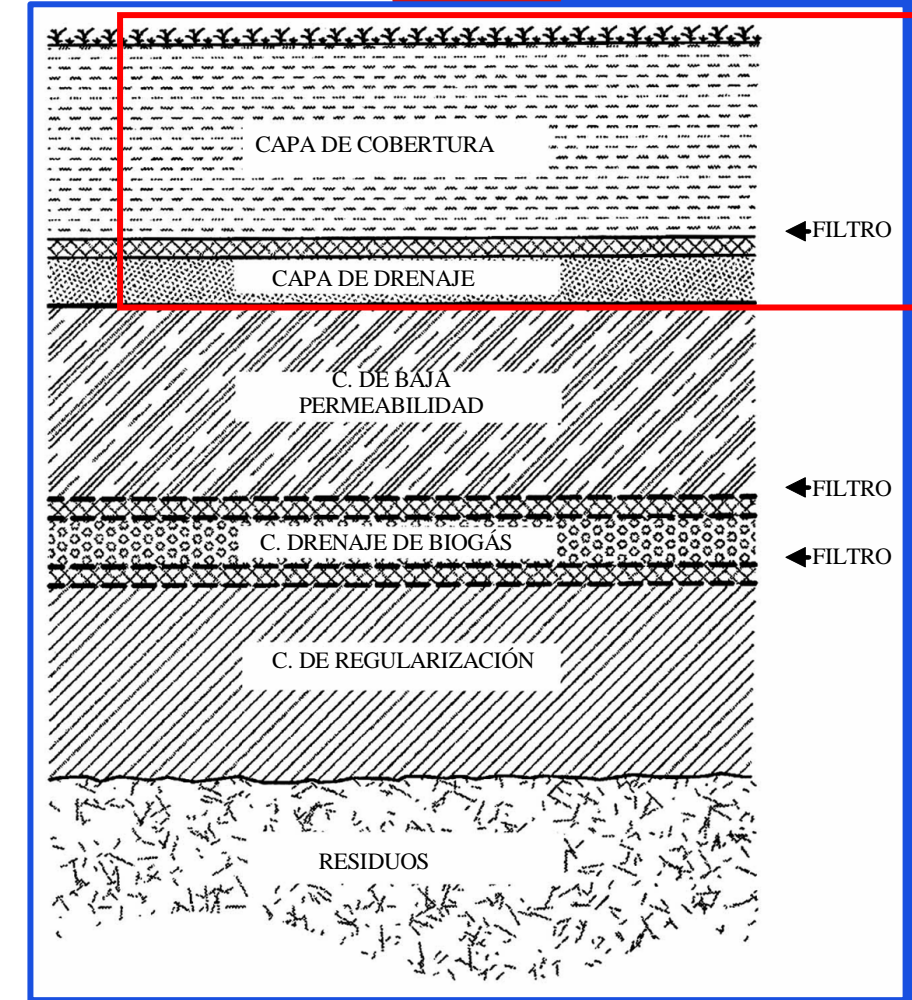
- suelos arcillosos compactados + geomembrana.
- geosintético bentonítico
- Geomembrana



3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.2 Sistema de recubrimiento

- Capa de drenaje:
suelos granulares (arenas y gravas); espesor > 0,5 m
geocompuesto drenante
- Capa de filtro:
natural o geosintético
- Capas de protección vegetativa y de tierras de cobertura:
espesor, inclinación y características edafológicas (pH, contenido en nutrientes, etc.) compatibles con el tipo de vegetación y clima locales.



3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.2 Sistema de recubrimiento

- Recomendaciones de diseño según el **Real Decreto 646/2020**, en función de la posibilidad de formación de cantidades apreciables de lixiviados o gases que pudieran poner en peligro el medio ambiente:

Clase de vertedero	No peligroso	Peligroso
Capa de drenaje de gases.	Exigida	No exigida
Revestimiento de impermeabilización artificial.	No exigida	Exigida
Capa mineral impermeable.	Exigida	Exigida
Capa de drenaje > 0,5 m.	Exigida	Exigida
Cobertura superior de tierra > 1 m.	Exigida	Exigida

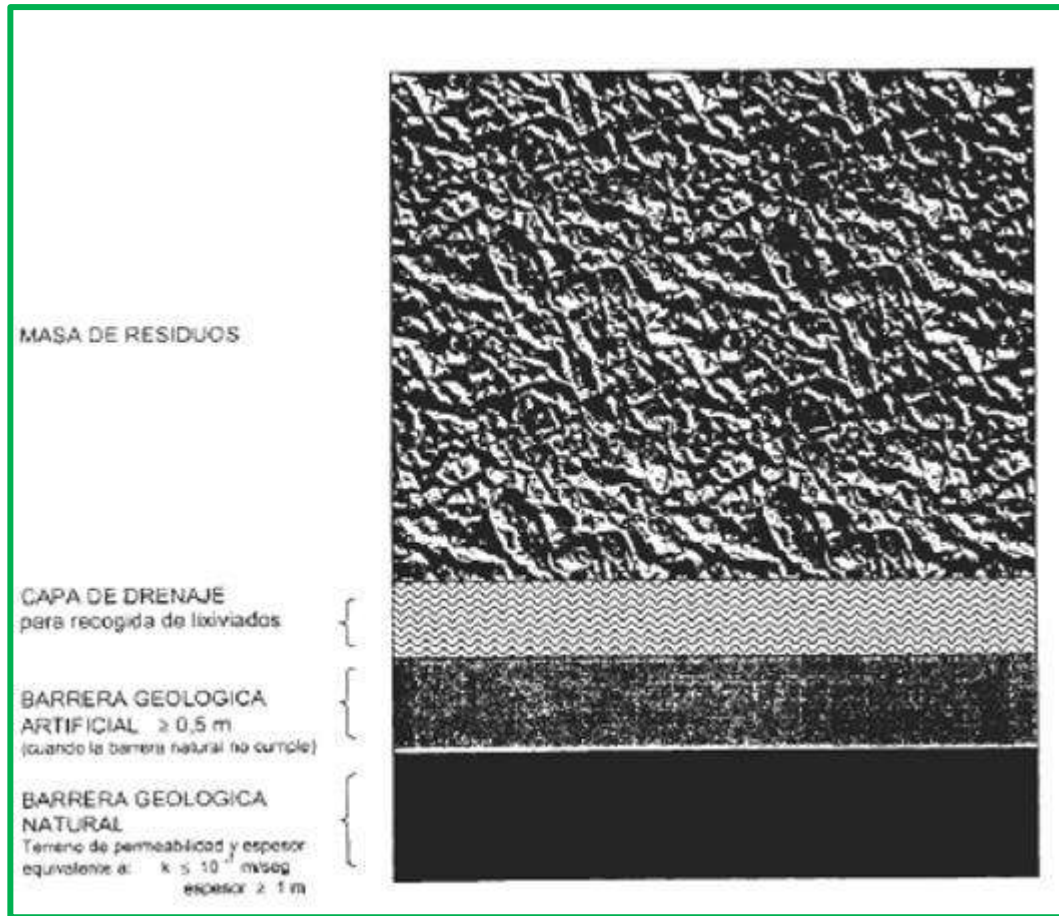
- Para la construcción de la **cubierta**, así como para tareas de mantenimiento posteriores se utilizarán **áridos** y otros **materiales procedentes de la valorización de residuos** siempre que los mismos cumplan con los requisitos adecuados para los fines de aislamiento que se persiguen.



3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

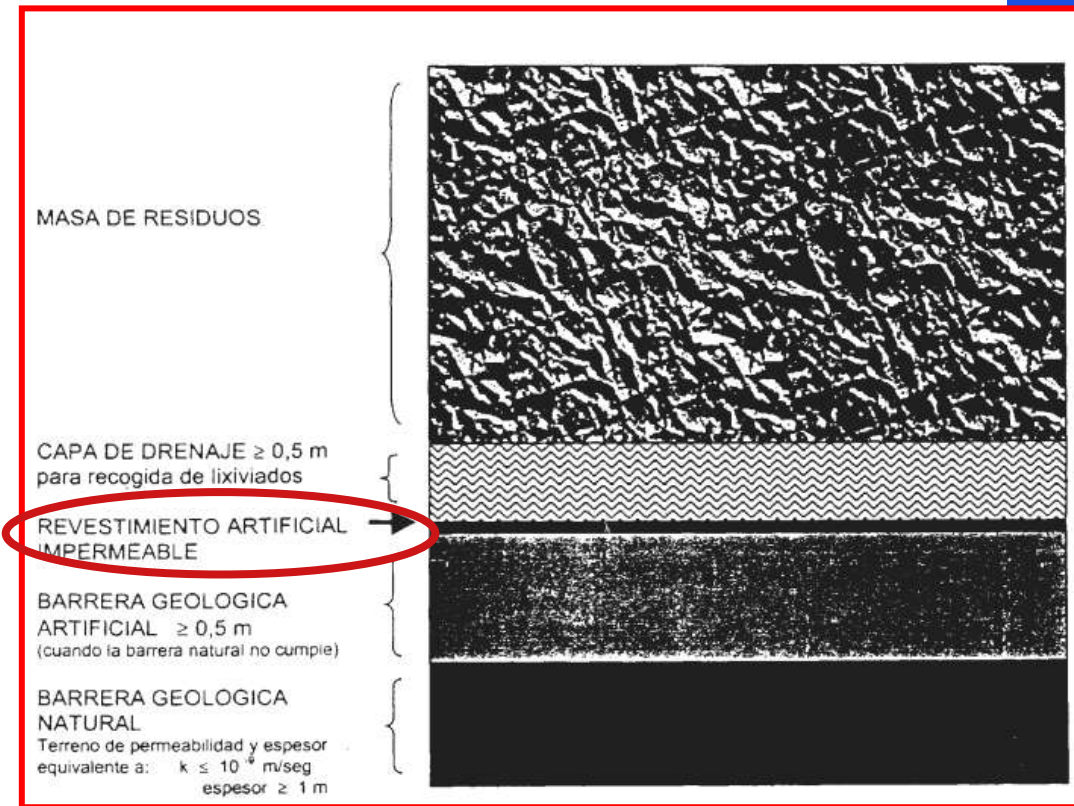
3.3 Sistema de confinamiento basal o de fondo

Vertedero Residuos Inertes



$$k \leq 10^{-7} \text{ cm/s}$$

Vertedero Residuos No Peligrosos



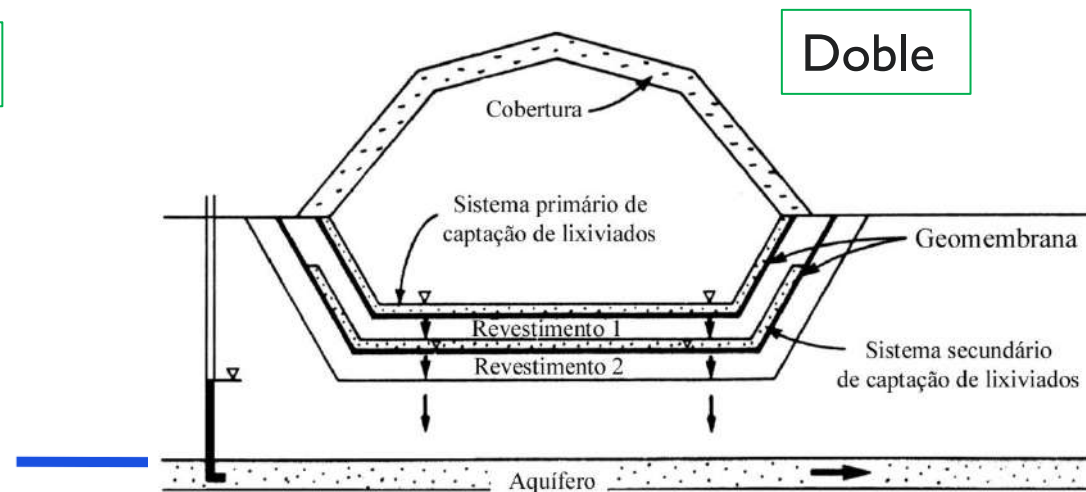
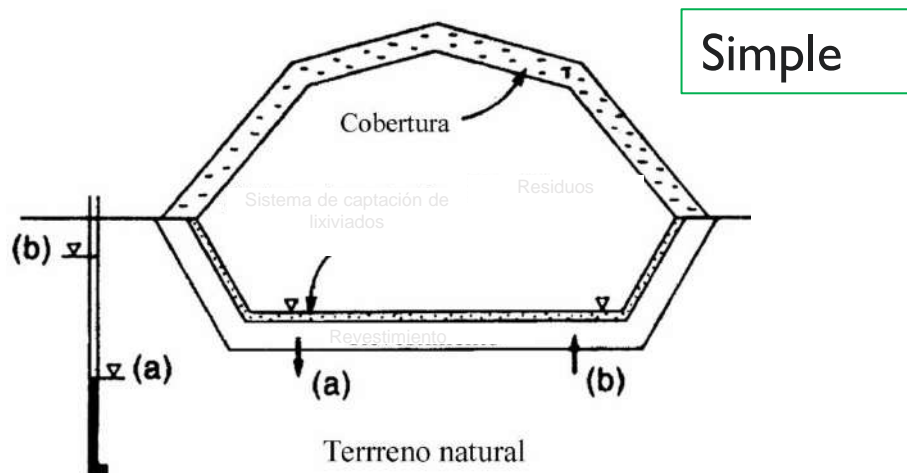
$$k \leq 10^{-9} \text{ cm/s}$$

3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.3 Sistema de confinamiento basal o de fondo

➤ Tipos de sistemas de confinamiento en la base de los vertederos:

- Simples
- Dobles:
 - Un nivel de revestimiento primario
 - Una capa de drenaje secundaria → control de los lixiviados que atraviesen el primer nivel de revestimiento
 - Un nivel de revestimiento secundario
- **Los sistemas dobles:**
 - No requeridos por la legislación europea
 - Adecuados para vertederos de residuos peligrosos



3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.3 Sistema de confinamiento basal o de fondo



3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.3 Sistema de confinamiento basal o de fondo



3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.3 Sistema de confinamiento basal o de fondo



3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.3 Sistema de confinamiento basal o de fondo



3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.3 Sistema de confinamiento basal o de fondo

Barrera impermeable (**geológica natural** o artificial)

Objetivo: controlar la fuga de lixiviados hacia el terreno natural.

- Funciones de la capa de suelos arcillosos compactados:
 - barrera al flujo de líquidos:
 - baja permeabilidad.
 - atenuación de sustancias contaminantes:
 - procesos de absorción:
 - intercambio iónico;
 - precipitación de metales pesados;
 - interacción de poluentes orgánicos con la materia orgánica del suelo
 - procesos de biodegradación

3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.3 Sistema de confinamiento basal o de fondo

Barrera impermeable (**geológica natural** o artificial)

- **Materiales más comunes:**

- Suelos naturales con un cierto contenido de arcilla, CL, CH o SC
 - Índice de plasticidad, $IP > 10\%$
 - $IP < 30\% - 40\% \rightarrow$ trabajabilidad
 - Contenido de finos (tamiz #200, ASTM) $> 30\%$
 - Tamaño máximo de partícula: 25 - 50 mm
 - Porcentaje máximo de gruesos (tamiz n° 4, de 4,75 mm): 30% \rightarrow evitar segregación de gravas
- Materiales dúctiles: mezclas de arena y arcilla
- Suelos con adición de montmorillonitas

3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.3 Sistema de confinamiento basal o de fondo

Barrera impermeable (**geológica natural** o artificial)

• Compactación:

- **Objetivo principal:** deshacer y amasar los terrones de suelo para obtener masa homogénea y eliminar macroporos



Influencia de la presencia de terrones intactos en la permeabilidad de la capa de suelos compactados



3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.3 Sistema de confinamiento basal o de fondo

Barrera impermeable (**geológica natural** o artificial)

- Compactación:

- Influyen en la permeabilidad del revestimiento:
 - la humedad, el método y la energía de compactación
 - El tiempo de hidratación
- Los valores de densidad seca y humedad de compactación admisibles delimitan una “**zona aceptable**” en el gráfico de compactación

- Criterios de aceptabilidad:

- Permeabilidad: lo ideal, una humedad del 1 a 7 % por encima del valor óptimo
- Resistencia: densidad seca adecuada
- Retracción: mayor cuanto mayor la humedad de compactación

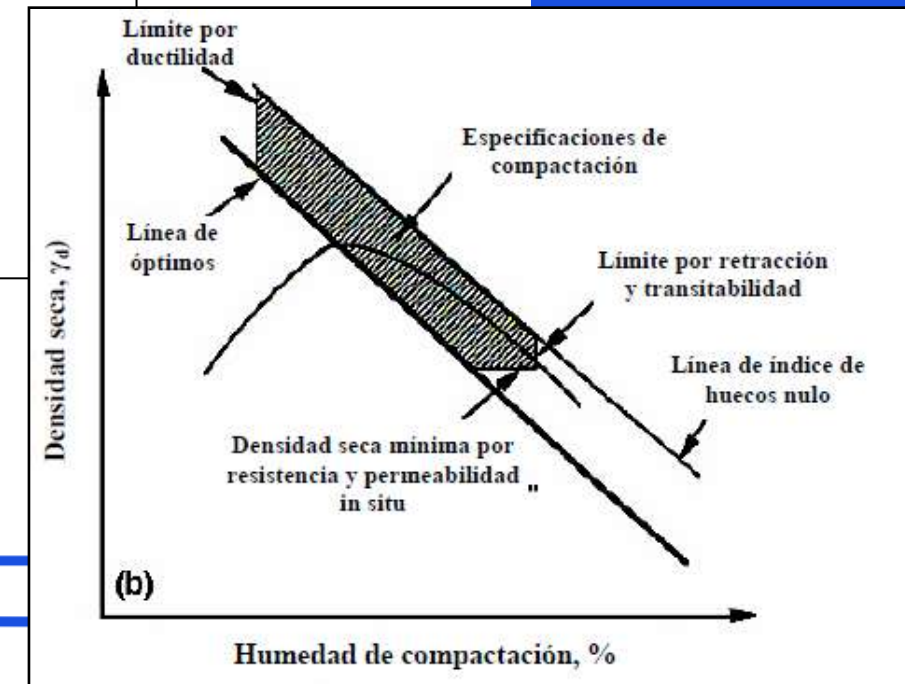
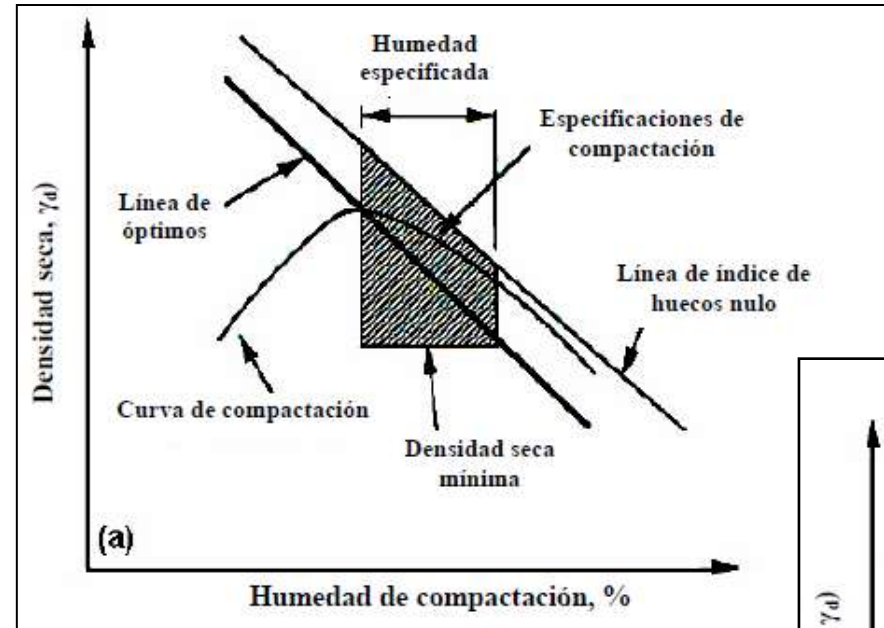
3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.3 Sistema de confinamiento basal o de fondo

Barrera impermeable (**geológica natural** o artificial)

Compactación

- a) Especificaciones convencionales de compactación
- b) Especificaciones recomendables (Benson et al., 1999).



3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.3 Sistema de confinamiento basal o de fondo

Barrera impermeable (**geológica natural** o artificial)

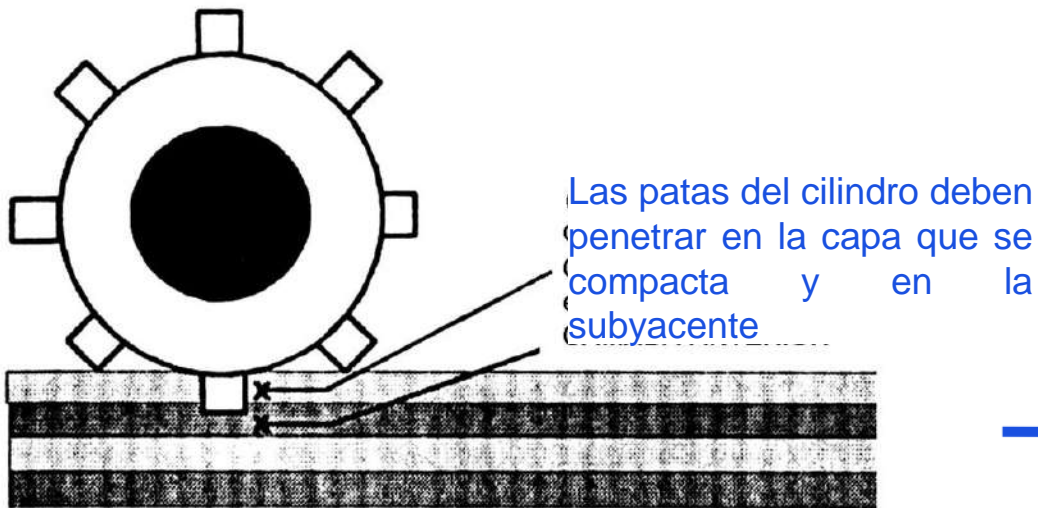
• Método de compactación:

• Energía de compactación:

- energías elevadas: mayor densidad seca y menor permeabilidad → equipos de compactación pesados (peso superior a 10 t)

• Compactador:

- cilindro de pata de cabra, con espigones suficientemente largos
- acción de amasado del suelo, quebrando y deshaciendo los terrones de arcilla compacta y seca, y homogeneizando el material.



3- EL VERTEDERO COMO ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.3 Sistema de confinamiento basal o de fondo

Barrera impermeable (**geológica natural** o artificial)

- **Construcción del revestimiento:**
 - Protección de las tongadas construidas de la desecación y precipitaciones
 - Reparación de no conformidades respecto a los criterios de compactación
 - Densidad baja: recompactación
 - Humedad baja: escarificado, adición de agua, tiempo de hidratación y recompactación
 - ¡Cuidado si hay geosintéticos subyacentes!
 - Espesores de revestimiento mayores en zonas críticas

4- GEOSINTÉTICOS EN VERTEDEROS

ISO 10318-2

Funciones:

- Separación
- Refuerzo
- Filtro
- Drenaje
- Barrera hidráulica o al gas
- Protección

ISO TC 221-GEOSYNTHETICS

CEN/TC 189 - GEOTEXTILES AND
GEOTEXTILE-RELATED PRODUCTS

UNE CTN 104 - Materiales impermeabilizantes
para la construcción y geosintéticos

norma
española

UNE 104425

Noviembre 2001

TÍTULO

Materiales sintéticos

Puesta en obra

Sistemas de impermeabilización de vertederos de residuos con
láminas de polietileno de alta densidad (P.E.A.D.)

UNE
Normalización Española

Norma Española
UNE-EN 13257
Marzo 2017

Geotextiles y productos relacionados

Características requeridas para su uso en los
vertederos de residuos sólidos

Contáctese con Nosotros

IGSsec@GeosyntheticsSociety.org
www.GeosyntheticsSociety.org

CEDEX

- Laboratorio de
Geotecnia

4- GEOSINTÉTICOS EN VERTEDEROS

Tipos de geosintéticos:

- Geotextiles
- Geomembranas
- Geocompuesto drenante
- Geosintéticos bentoníticos
(geocompuesto impermeabilizante de arcilla, GCL)
- Geomallas
- Georredes
- Geotubos



CEDEX

Laboratorio de
Geotecnia



4- GEOSINTÉTICOS EN VERTEDEROS

Funciones de los geosintéticos en los vertederos:

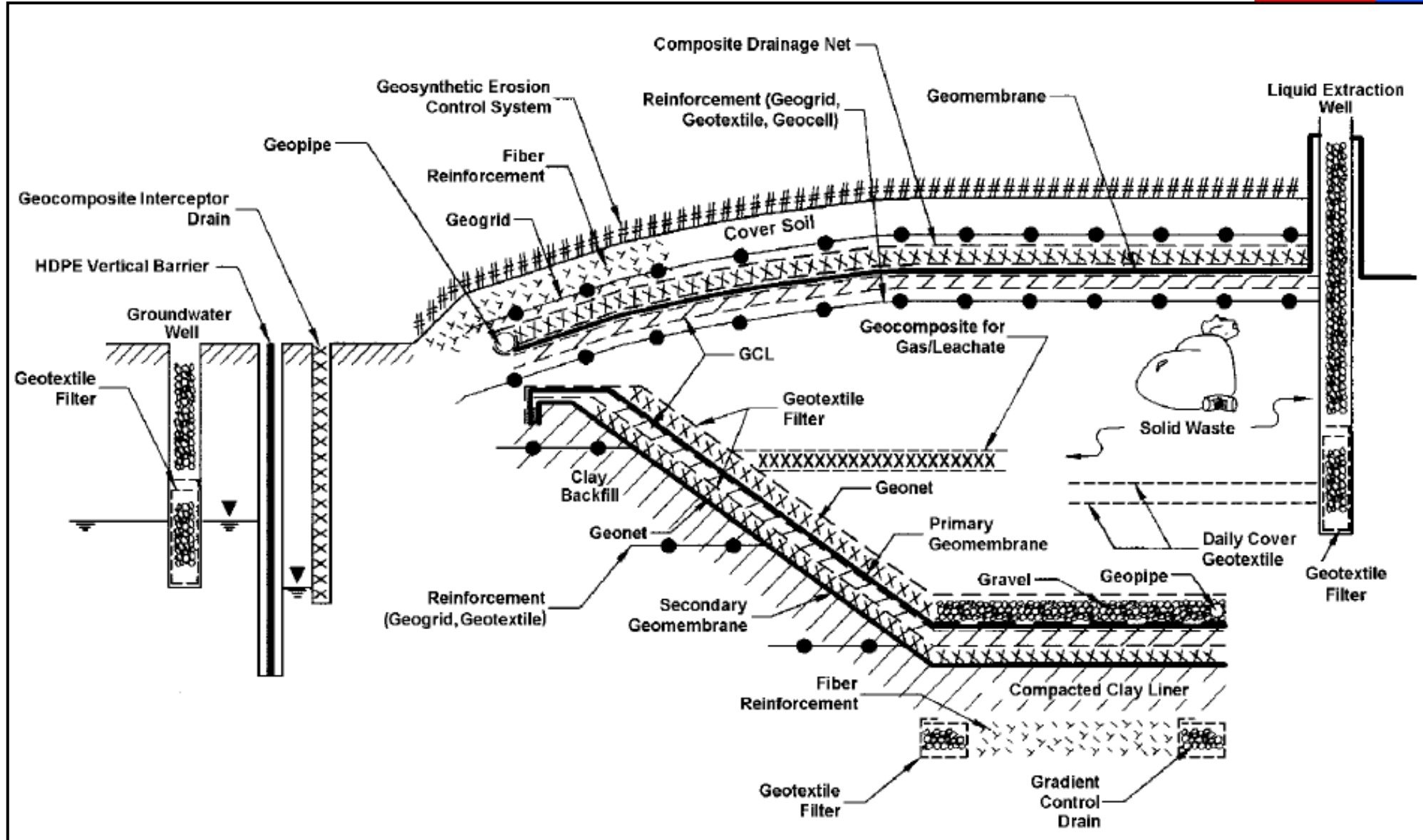
Tipo de Geosintético	SEPARACIÓN	DRENAJE	FILTRO	REFUERZO	BARRERA HIDRÁULICA / GAS	PROTECCIÓN
Geotextil no tejido	P	*	P		P ¹	P
Geotextil tejido	P		*	P		
Geomalla				P		
Geomembrana					P	
Geocelda	P			P		
Geosintético bentonítico (GCL)					P	*
Geocompuestos	*	P	*	*	P	P
Georred		P				
Geotubo		P				

P: función principal *: función secundaria 1: geotextil saturado de asfalto



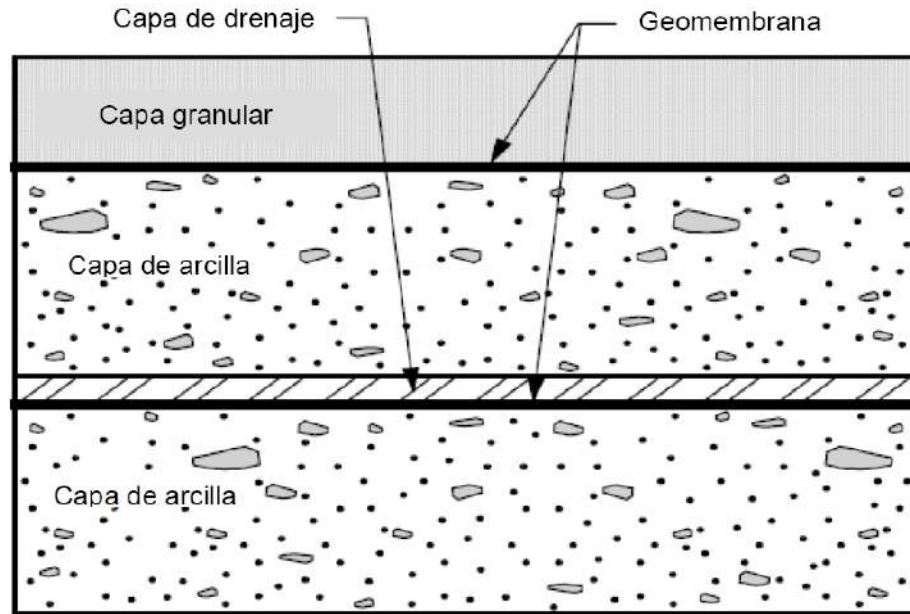
4- GEOSINTÉTICOS EN VERTEDEROS

Funciones de los geosintéticos en los vertederos:

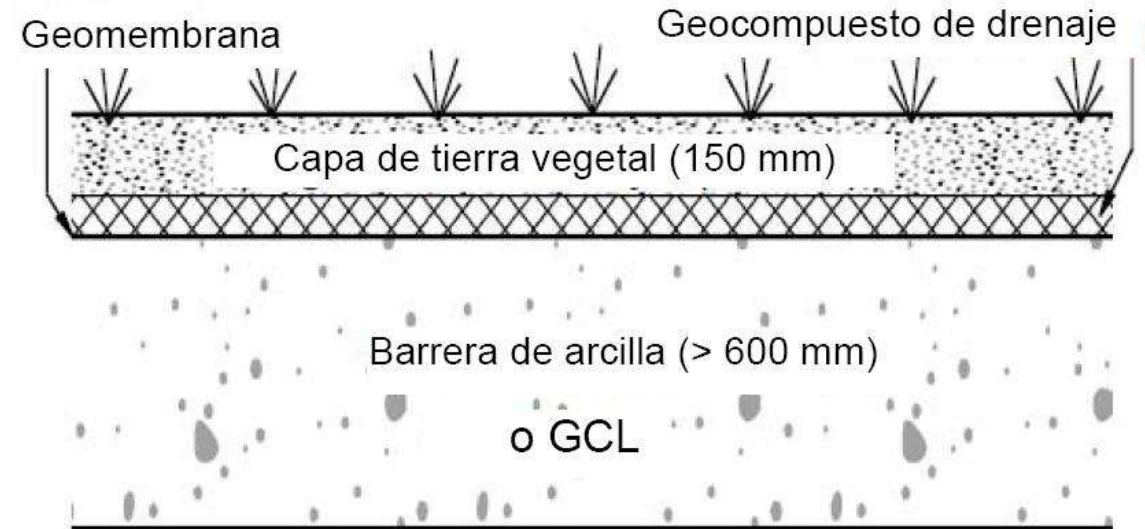


4- GEOSINTÉTICOS EN VERTEDEROS

Funciones de los geosintéticos en los vertederos:



Utilización de geomembrana
en un sistema de
revestimiento de fondo
doble

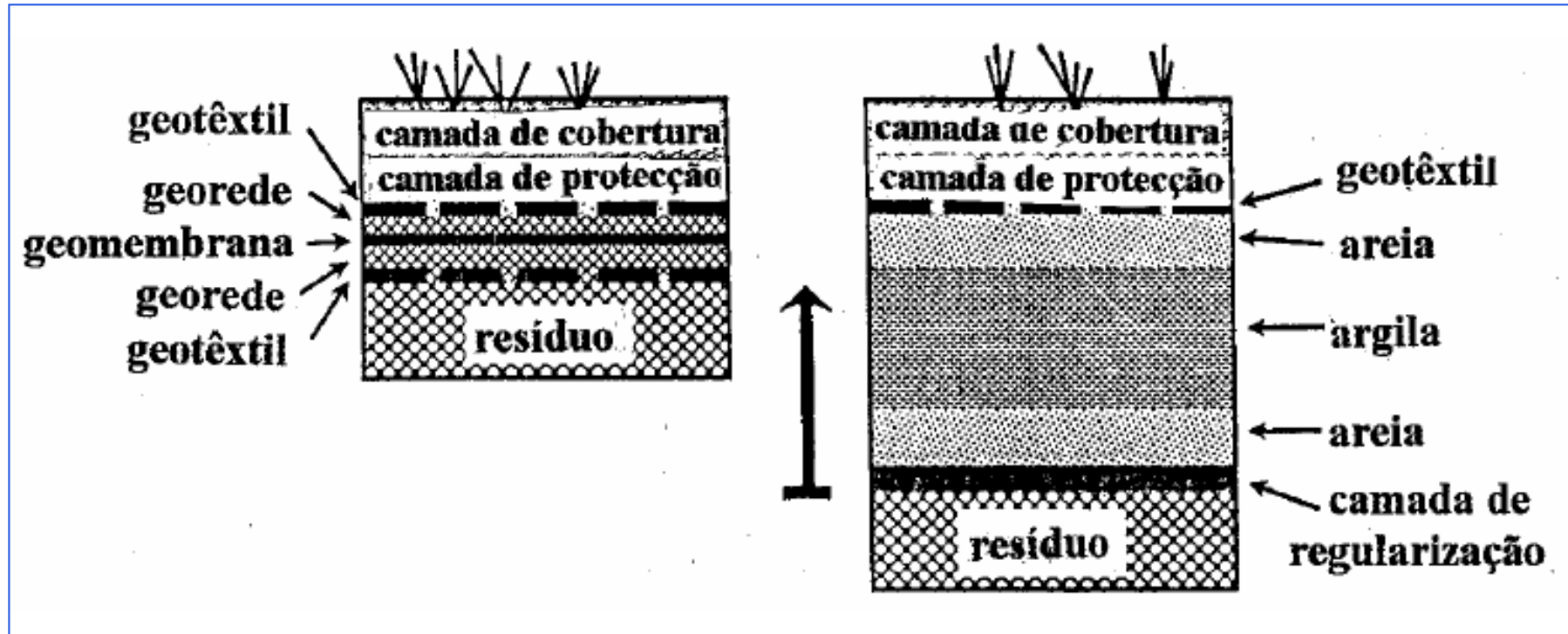


Utilización de geocompuesto en el
sistema de cobertura

4- GEOSINTÉTICOS EN VERTEDEROS

Funciones de los geosintéticos en los vertederos:

¿Geosintéticos o capas minerales (barrera arcilla)?



4- GEOSINTÉTICOS EN VERTEDEROS

Funciones de los geosintéticos en los vertederos:

¿Geosintéticos o capas minerales (barrera arcilla)?

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Rapidez de instalación - Mano de obra menos experimentada - Coste bajo - Muy baja permeabilidad si instalado correctamente - Puede resistir grandes asientos diferenciales - Buenas propiedades de autocurado - No se depende de suelos locales - Fácil de reparar - Resistencia a ciclos de hielo-deshielo - Más espacio para residuos - No es preciso ensayar la permeabilidad in situ - Hidratado, es excelente barrera para el gas - Reduce la sobrecarga sobre substrato compresible (residuos) 	<ul style="list-style-type: none"> - Baja resistencia al corte de la bentonita hidratada (en GCL sin refuerzo) - Los GCL pueden punzonarse durante la instalación - Posible pérdida de bentonita durante la instalación - La bentonita seca deja pasar el gas - Potenciales problemas de resistencia en interfaces - Menor capacidad de atenuación de lixiviados - Posible pérdida de resistencia post-pico - Posible mayor permeabilidad a largo plazo por pérdida de bentonita (bajo presión) - Posible aumento de permeabilidad por problemas de compatibilidad con contaminantes, si no se prehidrata con agua compatible - Mayor flujo por difusión - Propensión a intercambio iónico - Propensión a desecación si no está debidamente cubierto (al menos 0,6 m de suelos)

Ventajas y desventajas de los geosintéticos bentoníticos respecto a las capas minerales (Bouzza, 2002)

5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS

DERRUMBAMIENTO VERTEDERO DE ZALDIBAR

El Gobierno vasco da por finalizadas las labores de búsqueda en el vertedero de Zaldibar sin hallar a Joaquín Beltrán

MIKEL ORMAZABAL | San Sebastián | 14 MAY 2021 - 08:53 CEST

Un informe oficial apunta a la fuerza del derrumbe y la descomposición del cuerpo por las altas temperaturas como causas del resultado negativo del rastreo



EL PAÍS

Vertedero Xerolakka, Grecia, 2010:

12.000 m³

Deslizamiento exclusivamente de la masa de residuos, extensión: 50x30 m²

(Zekkos et al., 2013)



5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS

(Blight, 2006), ver Readdy and MunwarBasha (2017)

Año	Localización	Residuos compactados	Volumen de residuos deslizado, m ³	Distancia deslizada, m	Consecuencias
1977	Sarajevo, Bosnia	No	200.000	1.000	2 puentes, 5 casas, gran daño ambiental
1993	Estambul, Turquía	No	12 – 15.000	60	59 muertos, 11 casas, sistema de alcantarillado
2000	Quezón City, Manila	No	10 – 12.000	40	278 muertos confirmados, gran número de viviendas
2005	Bandung, Indonesia	No	500.000 – 750.000	900	147 muertos, fondo del valle cubierto de residuos
1997	Bogotá	Sí	1,5 x 10 ⁶	500	Daño ambiental, río afectado
1997	Durban, Sudáfrica	Sí	150 – 180.000	80	Sin daño ambiental, deslizamiento confinado al local
2010	Xerolakka, Grecia	Sí	12.000 m ³	60	Deslizamiento en la masa de residuos, sólo daños materiales en la instalación
2020	Zaldívar, España	Sí (residuos industriales “no peligrosos”)	725 000 m ³	100-200. Movimiento traslacional, al deslizar la masa de vertidos sobre el paquete de impermeabilización del vertedero.	Dos trabajadores muertos; cortes de autovía y carretera. Incendio durante 9 días, liberando sustancias contaminantes a la atmósfera. Reclamaciones: 28,7 millones €

5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS

Los análisis de estabilidad de un vertedero deben incluir:

- Capacidad de soporte del terreno de cimentación;
- Estabilidad de taludes;
- Asientos y deformaciones;
- Efectos sísmicos sobre la estabilidad.

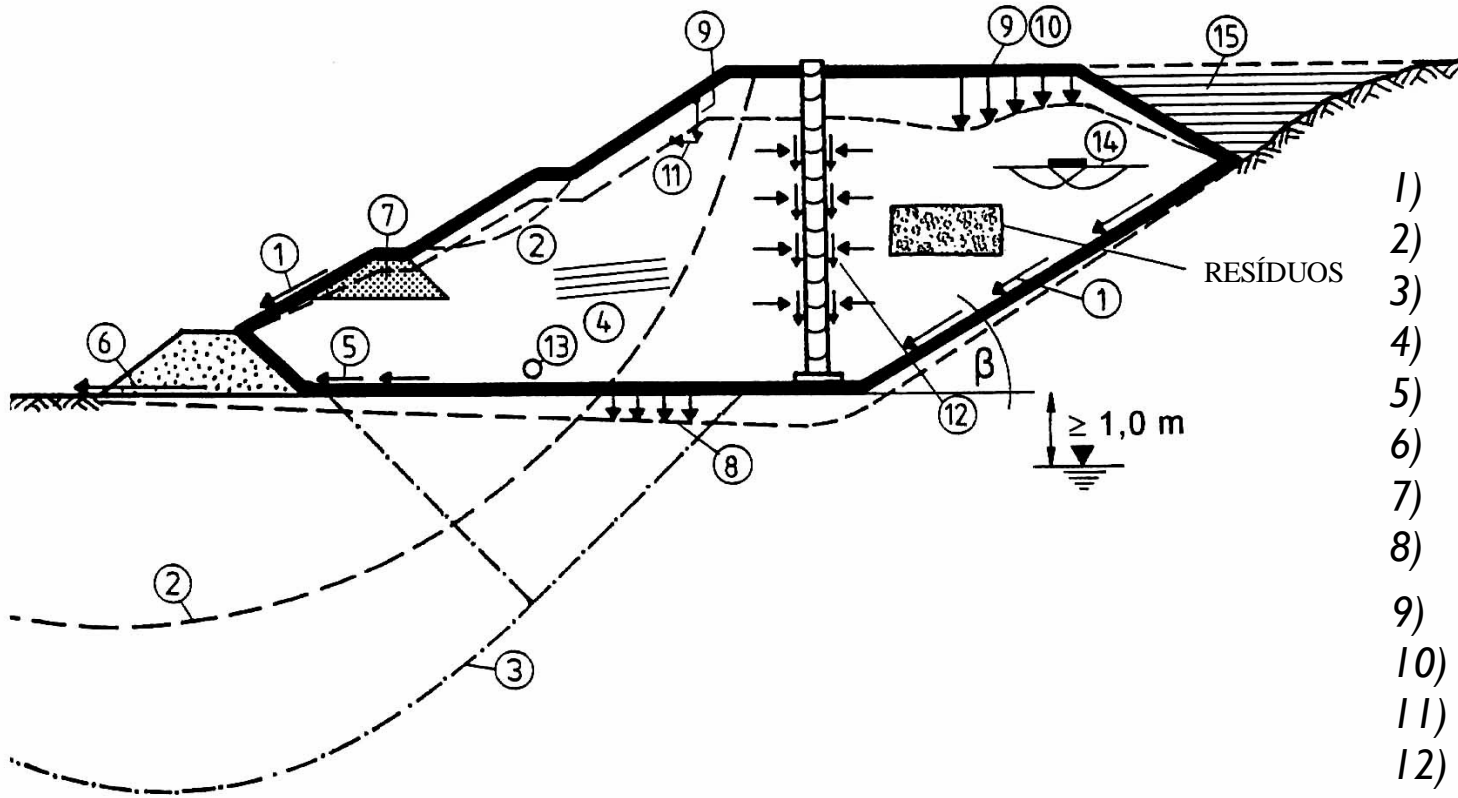
Deben analizarse diversos casos de carga y fases de la vida de la obra:

Fase de construcción de la infraestructura
Fase de explotación del vertedero
Fase posterior a la clausura



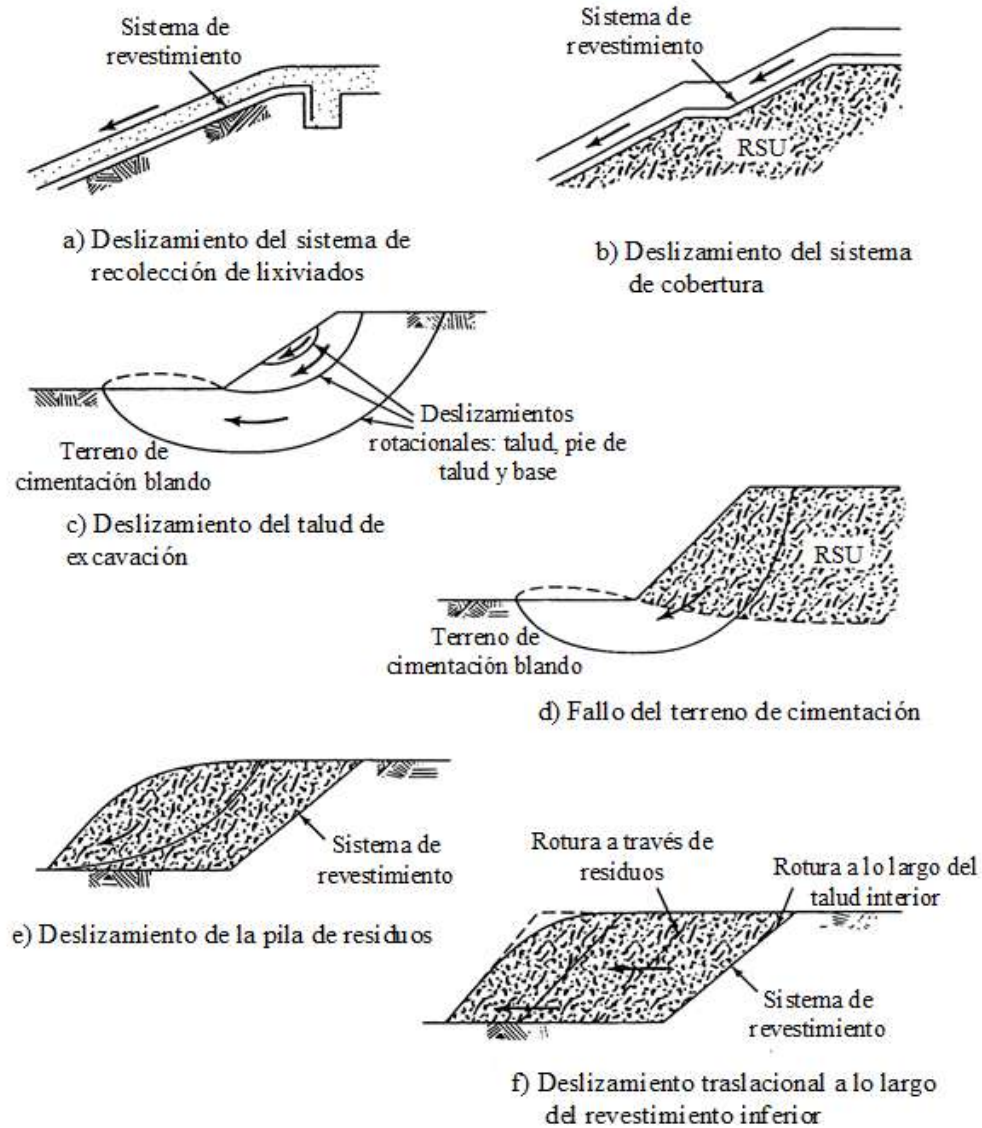
5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS

Tipologías Roturas en Vertederos (Quian et al. 2002)



- 1) Deslizamiento del recubrimiento
- 2) Rotura del talud; local, global
- 3) Fallo de la cimentación
- 4) Deslizamiento a lo largo de juntas internas
- 5) Tensiones de tracción
- 6) Estabilidad de los diques de contención
- 7) Estabilidad de los diques perimetrales
- 8) Asientos de la cimentación
- 9) Asientos de los residuos
- 10) Asientos diferenciales
- 11) Desplazamientos laterales
- 12) Estabilidad de pozos, tuberías y ligaciones
- 13) Estabilidad de los tubos de drenaje de lixiviados
- 14) Rotura local de residuos durante la explotación
- 15) Efecto de rellenos adicionales

5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS



Tipologías Roturas en Vertederos (Quian et al. 2002)

5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS

Estabilidad en RD 646/2020

Anexo I-Requisitos Generales

La **colocación** de los residuos en el vertedero se hará de manera tal que garantice la **estabilidad de la masa de residuos y estructuras asociadas**, en particular para evitar los **deslizamientos**. Cuando se instale una **barrera artificial**, deberá comprobarse que el sustrato geológico, teniendo en cuenta la morfología del vertedero, es suficientemente estable para **evitar asentamientos** que puedan causar daños a la barrera.

Anexo II-Vertederos Subterráneos

- Estabilidad del hueco
- Capacidad portante del sustrato (evitar movimientos durante explotación)
- Estabilidad del residuo

Anexo V-Autorización apertura vertedero

9ª) La descripción de las **características constructivas** del vertedero y de **estabilidad geomecánica** de los residuos vertidos.

5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS

Estabilidad en Pliegos-Contratos

Dichos estudios deberán contemplar:

- Estudio de Estabilidad, definiendo los Coeficientes de Seguridad tanto en condiciones drenadas como de fallo del drenaje. El objeto de este Estudio es determinar si con los datos de topografía, geotecnia y de toma "in situ" los cálculos reflejan:
 - $FS \geq 1,5$ para condiciones drenadas
 - $FS \geq 1,30$ para condiciones de fallo de drenaje
- Cálculo de la Probabilidad de Rotura.
- Cálculo del Volumen potencial de movilización.
- Obtención de Deformaciones para poder comparar con los controles topográficos.

...Poca definición

5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS

Estabilidad – Factores Desencadenantes

Feng et al. (2021)

- Falta de capacidad portante del sustrato
- Fuertes lluvias
- Acción humana (excavaciones / sobrecarga / mal operacional)

(Reddy and MunwarBasha, 2014)

- Características materiales - geosintéticos



Deslizamiento Payatas (Filipinas)

Los problemas han permitido conocer:

- Cómo se rompen
- Porqué se rompen



Determinar cómo estudiarlos

5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS

Junio 2023



MINISTERIO PARA LA
TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

SECRETARIA DE ESTADO DE
MEDIO AMBIENTE
DIRECCION GENERAL DE
CALIDAD Y EVALUACIÓN
AMBIENTAL

RECOMENDACIONES PARA EL ESTABLECIMIENTO DE CRITERIOS DE UBICACIÓN, DISEÑO Y PROGRAMAS DE VIGILANCIA EN VERTEDEROS. V.1.1.

ÍNDICE

I. CRITERIOS PARA LA UBICACIÓN DE VERTEDEROS

- 1. Terrenos en zonas restringidas7
- 2. Terrenos con limitaciones..... 10

II. ESTUDIOS RECOMENDADOS PARA LA UBICACIÓN DE UN VERTEDERO

- 1. Datos Meteorológicos..... 16
- 2. Reconocimiento geológico, geotécnico e hidrogeológico de los terrenos en que se pretende ubicar un vertedero..... 17

III. ELEMENTOS DE DISEÑO DE VERTEDEROS

- 1. Sistemas de recogida y evacuación de aguas pluviales.25
- 2. Barrera geológica artificial, sistemas de impermeabilización lateral de fondo, cubiertas de sellado...26
- 3. Estabilidad de los vertederos. 34

5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS

RECOMENDACIONES PARA EL ESTABLECIMIENTO DE CRITERIOS DE UBICACIÓN, DISEÑO Y PROGRAMAS DE VIGILANCIA EN VERTEDEROS. V.1.1.

Entre los requisitos exigibles en el planeamiento de los vertederos se debe señalar la necesidad de que su geometría y características constructivas se traduzcan en la conformación de estructuras mecánicamente estables incluso en condiciones de fallo que puedan provocar una inestabilidad en el vertedero con consecuencias para la seguridad de las personas y/o el medio ambiente. En tal sentido se consideran los siguientes escenarios de riesgo:

- Riesgo Bajo: solo daños materiales
- Riesgo Medio: daños significativos al medio ambiente
- Riesgo Alto: daño a personas o medio ambiente irreversible

5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS

RECOMENDACIONES PARA EL ESTABLECIMIENTO DE CRITERIOS DE UBICACIÓN, DISEÑO Y PROGRAMAS DE VIGILANCIA EN VERTEDEROS. V.1.1.

1-Superficies de contacto a analizar

- Estabilidad del conjunto vertedero-terreno.
- Estabilidad interna de la masa de residuos.
- Estabilidad local de la capa de sellado por deslizamiento del contacto de los distintos elementos del sellado.
- Estabilidad del conjunto vertedero -impermeabilización de fondo-, si procede, por deslizamiento entre distintos elementos de la capa impermeable. En el caso de que en la impermeabilización de fondo se haga uso de láminas texturizadas el incremento en los coeficientes de fricción se determinará tomando en consideración la carga ejercida por los residuos en la cota de llenado del diseño.

2-Escenarios:

- Normal:
 - Bajo riesgo sísmico
 - Sist. Drenaje OK
- Accidental:
 - Algo de lo anterior no se cumple

3-Factor de Seguridad

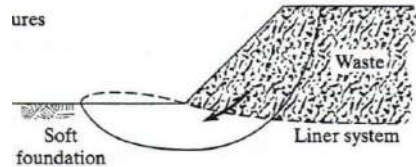
Situación de riesgo	Clase de vertedero		
	Residuos inertes	Residuos no peligrosos	Residuos peligrosos
Bajo	1.3	1.4	1.5
Medio	1.4	1.5	1.6
Alto	1.5	1.6	1.8

5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS - SUPERFICIES DESLIZAMIENTO

I-ESTABILIDAD CONJUNTO VERTEDERO-TERRENO

ope, toe and base)

ures



(d) Foundation failure through subsoil, liner and waste

Funciones del terreno de cimentación:

- mecánicas
- de protección ambiental

Funciones mecánicas:

- Garantizar la **estabilidad**:
 - estabilidad al deslizamiento
 - soportar las cargas
 - asientos y deformaciones
 - resistencia a los sismos
- Proporcionar **superficie de apoyo** estructuralmente estable y contacto satisfactorio con el sistema de confinamiento.
- Presentar un **régimen de filtraciones** y presiones intersticiales controlado.

5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS - SUPERFICIES DESLIZAMIENTO

I-ESTABILIDAD CONJUNTO VERTEDERO-TERRENO: Terreno cimentación

Capacidad portante y estabilidad del terreno de cimentación:

- Algunos accidentes graves por fallo de la cimentación
- Debe estar garantizada en todas las fases:
Construcción - Explotación - Post-sellado.

Verificaciones:

- tensiones, deformaciones y asientos en el terreno,
- capacidad portante,
- estabilidad frente a rotura a través de la cimentación,
- potencial de licuación,
- presiones intersticiales y filtraciones,
- posibilidad de subsidencias, disoluciones y erosiones internas



5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS - SUPERFICIES DESLIZAMIENTO

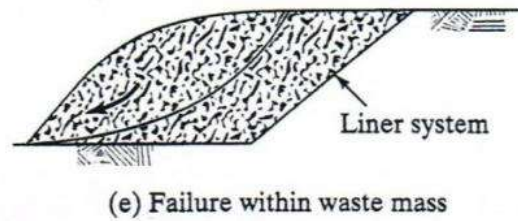
I-ESTABILIDAD CONJUNTO VERTEDERO-TERRENO: Terreno cimentación

Asientos en la base del vertedero:

- Afectan a la integridad y funcionalidad de los sistemas de revestimiento.
- Asientos diferenciales → más difíciles de prever; más críticos
- Especial atención a puntos singulares:
 - cargas singulares,
 - cimentaciones de pozos, estructuras rígidas
 - heterogeneidad del terreno
- Compatibilidad con inclinaciones del sistema de drenaje de lixiviados
- Asientos totales elevados → pueden dañar las conexiones con el exterior
- Técnica de compensación de cargas para minimizar asientos

5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS - SUPERFICIES DESLIZAMIENTO

2-ESTABILIDAD INTERNA DE LA MASA DE RESIDUOS – Ejemplo RSU

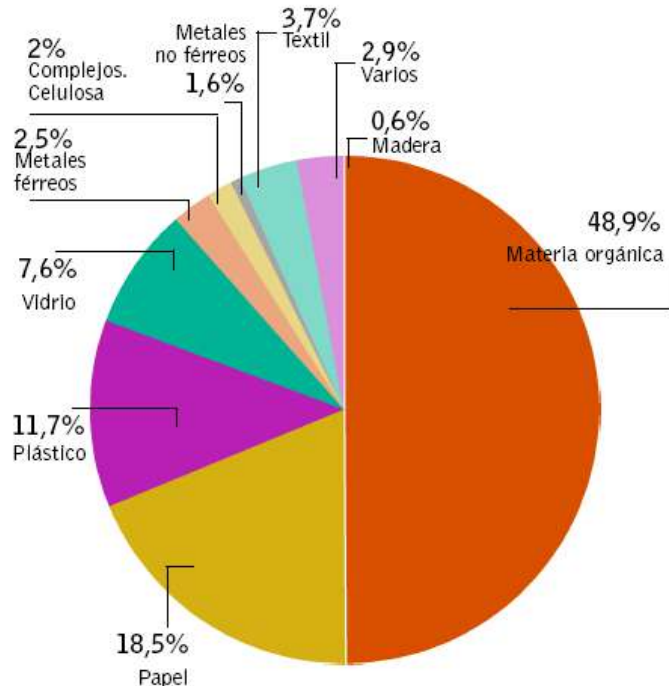


Caracterización de los residuos sólidos urbanos:

- Composición **compleja**
- Componentes **degradables y no degradables**
- Composición en origen evoluciona con el tiempo y el nivel de desarrollo (grado de reciclado en origen)

Fases en el vertedero:

- *descomposición aerobia*
- *descomposición anaerobia*
- **Producción de:**
 - *lixiviados*
 - *gas*
 - *calor*

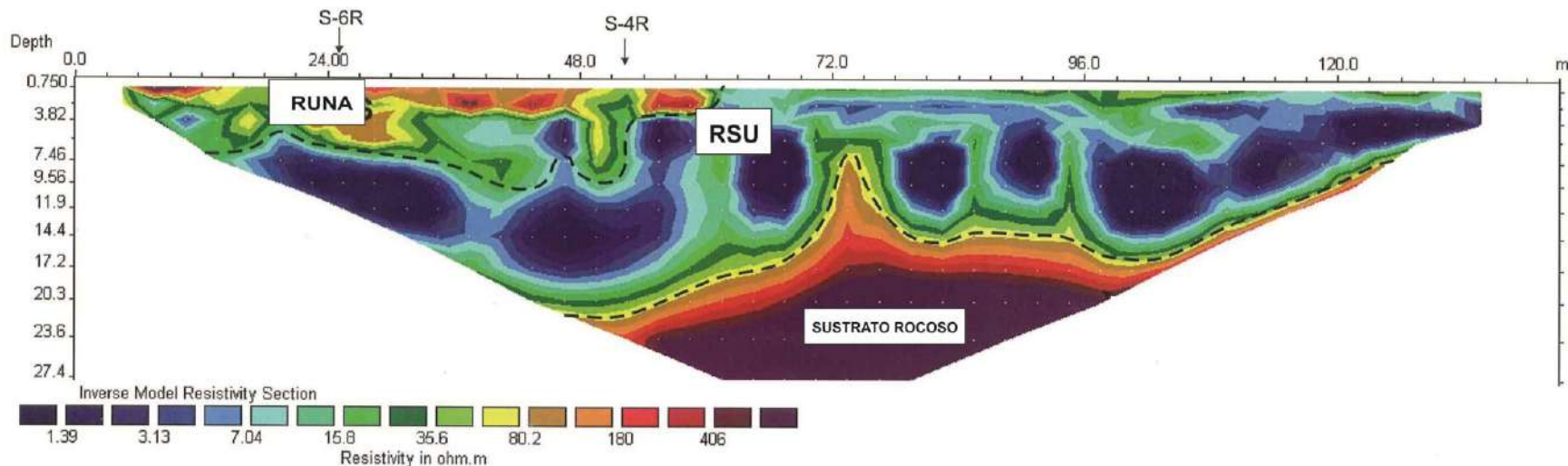


5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS - SUPERFICIES DESLIZAMIENTO

2-ESTABILIDAD INTERNA DE LA MASA DE RESIDUOS – Ejemplo RSU

Reconocimiento geotécnico de los RSU:

- Toma de muestras y ensayos de laboratorio → difíciles
- Ensayos in situ:
 - de penetración, estática y dinámica
 - geofísicos → métodos eléctricos, SASW



5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS - SUPERFICIES DESLIZAMIENTO

2-ESTABILIDAD INTERNA DE LA MASA DE RESIDUOS – Ejemplo RSU

Determinación parámetros Resistencia al Corte:

- ensayos de laboratorio: corte directo, triaxiales
 - muestras reconstruidas procedentes de vertederos
 - muestras artificiales en las que se substituyen algunos elementos (por ejemplo, arena en vez de piedras, pedazos de vidrio en vez de envases, hilos en vez de trapos, etc.)
 - muestras obtenidas mediante hincas de tomamuestras
- retroanálisis de ensayos de campo o casos de obra
- ensayos *in situ*



5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS - SUPERFICIES DESLIZAMIENTO

2-ESTABILIDAD INTERNA DE LA MASA DE RESIDUOS – Ejemplo RSU

Propiedades de los RSU:

- Parámetros de resistencia al corte:
 - Se utiliza normalmente el criterio de rotura de Mohr-Coulomb:
 - $s = c_a + \sigma \tan \phi_a$
 - Los parámetros resistentes evolucionan con el proceso de descomposición:
 - *incremento del contenido en plástico → disminución del ángulo de rozamiento (Gabr et al. , 2007):*
 - $\phi_{PLÁSTICO} = 18-19^\circ$
 - $\phi_{PAPEL} = 32^\circ$

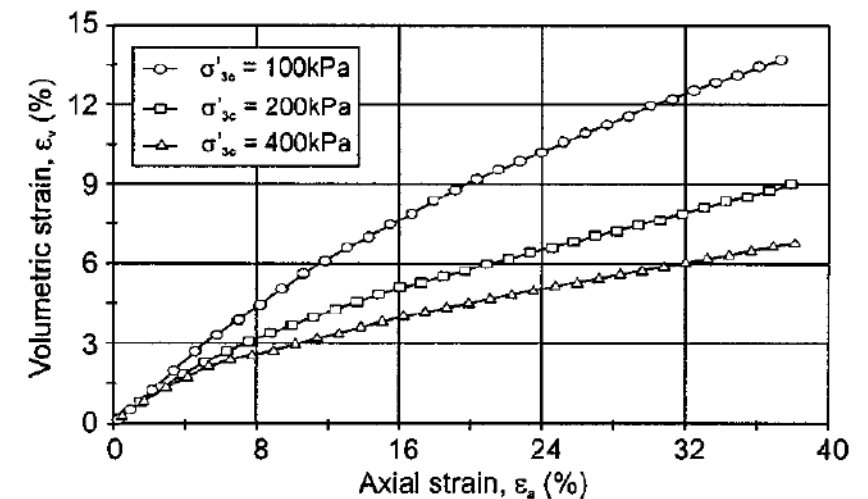
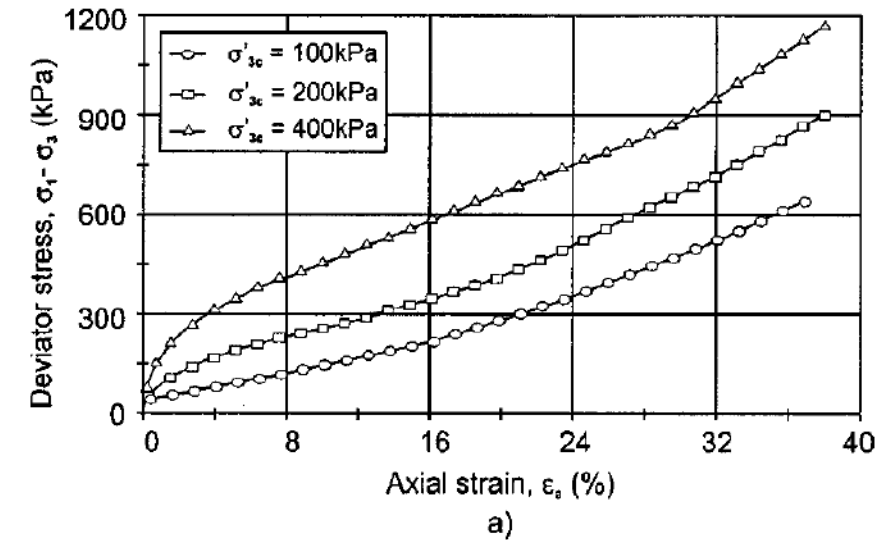
5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS - SUPERFICIES DESLIZAMIENTO

2-ESTABILIDAD INTERNA DE LA MASA DE RESIDUOS – Ejemplo RSU

Resistencia al corte de los RSU:

- no exhiben pico de resistencia en las curvas tensión/deformación
- es necesario definir, como criterio de rotura, un determinado nivel de deformaciones

*Resultados de ensayos triaxiales
(Machado et al., 2000)*



5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS - SUPERFICIES DESLIZAMIENTO

2-ESTABILIDAD INTERNA DE LA MASA DE RESIDUOS – Ejemplo RSU

Resistencia al corte de los RSU:

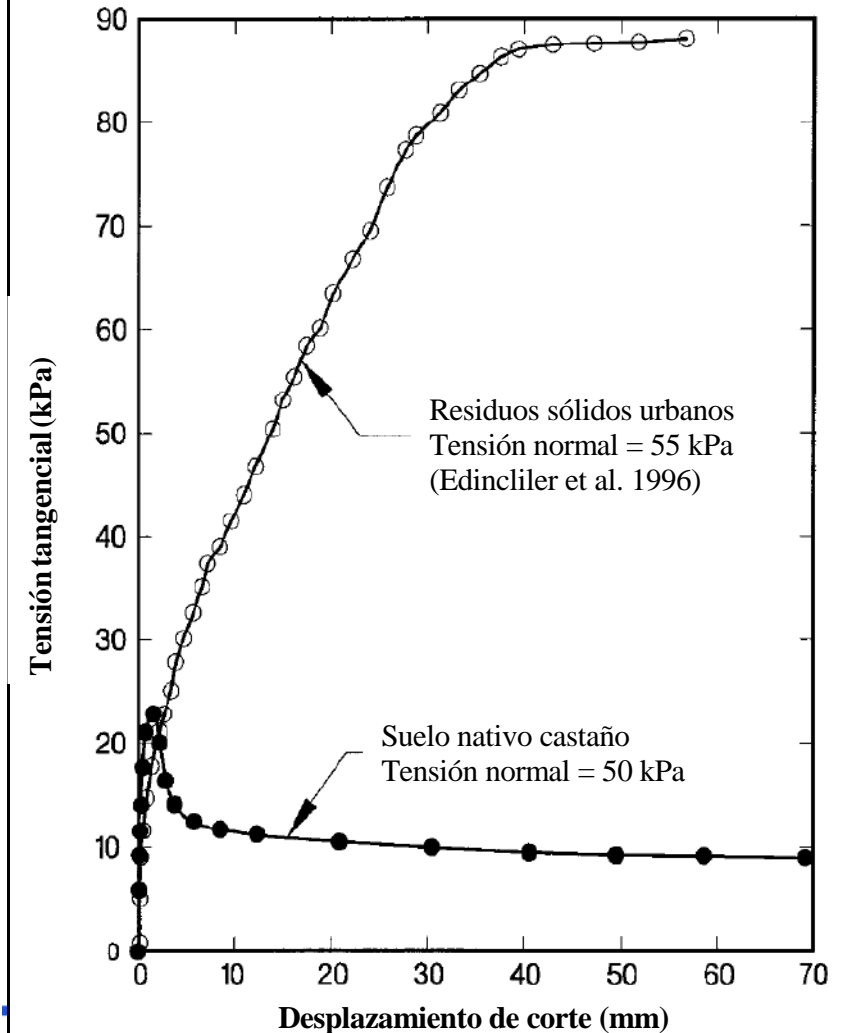
Elección de parámetros resistentes de los diferentes materiales:

- Resistencia de pico
- Resistencia residual
- Resistencia intermedia

→ Nivel de deformación esperable

→ Compatibilidad en deformaciones con los criterios de rotura para materiales contiguos

Desplazamiento/tensión tangencial en ensayo de corte rotacional sobre muestras de RSU y de un suelo natural (Eid et al. 2000)



5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS - SUPERFICIES DESLIZAMIENTO

2-ESTABILIDAD INTERNA DE LA MASA DE RESIDUOS – Ejemplo RSU

Propiedades de los RSU:

- Resistencia al corte: variación con el nivel de tensiones

Bray et al., (2009, 2011):

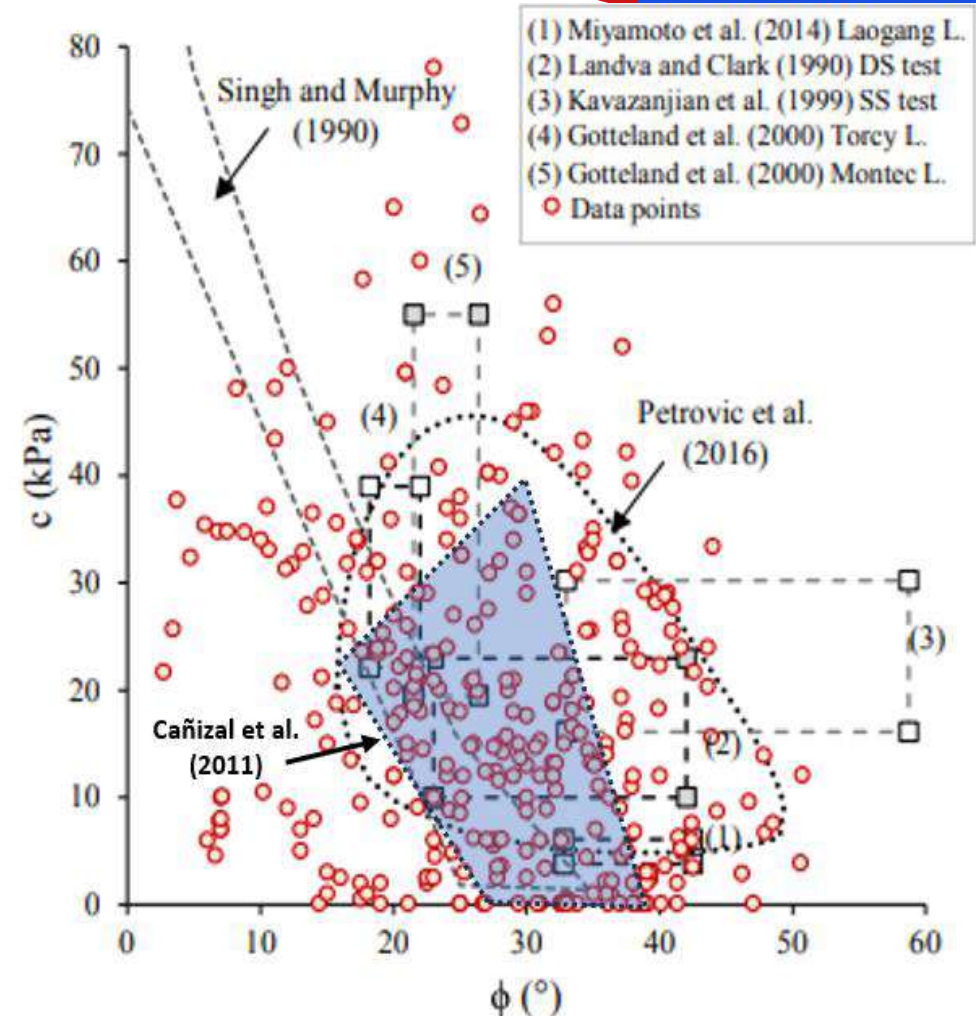
Envolvente de resistencia con base en gran número de ensayos triaxiales, de corte simple y de corte directo

$$\tau = c + \sigma_n \tan(\phi_\sigma)$$

ϕ_0 = ángulo de rozamiento para una tensión normal, σ_n , de 1 atm

$P_\alpha = 1 \text{ atm}$

$$\phi_\sigma = \phi_0 - \Delta\phi \log\left(\frac{\sigma_n}{P_\alpha}\right)$$



5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS - SUPERFICIES DESLIZAMIENTO

3-SUPERFICIE A LO LARGO DEL PAQUETE DE IMPERMEABILIZACIÓN

Posibles superficies críticas:

- Superficie de contacto (interfaz) entre geomembranas lisas y otros materiales
- Contacto entre geomembrana y suelos arcillosos compactados
- Contacto entre geomembrana y geosintético bentonítico

Tabla 2 – Ángulos de rozamiento entre geosintéticos y suelos

GEOSINTÉTICO	ÁNGULO DE ROZAMIENTO	
	ARENA	ARCILLA
geomembrana PVC	20°-30°	6°-15°
geomembrana PEAD	17°-25°	5°-10°
geomembrana PEAD rugosa	30°-40°	9°-15°
geotextil	22°-40°	15°-26° o parámetros resistentes del suelo

Tabla 3 – Ángulos de rozamiento entre diferentes tipos de geosintéticos

ROZAMIENTO ENTRE GEOSSINTÉTICOS	geomembrana PVC	geomembrana PEAD lisa	geomembrana PEAD rugosa	geomalla
geotextil tejido	10°-28°	7°-11°	9°-17°	9°-18°
geotextil no tejido agujeteado	16°-26°	8°-12°	15°-33°	10°-27°
geotextil no tejido termoligado	18°-21°	9°-11°	15°-16°	17°-21°
geomalla	11°-24°	5°-19°	7°-25°	-

5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS - SUPERFICIES DESLIZAMIENTO

3-SUPERFICIE A LO LARGO DEL PAQUETE DE IMPERMEABILIZACIÓN

ϕ°	Arcilla	Arena	Grava	Geotextil agujado	Geotextil Termosoldado	PEAD rugoso	PEAD liso	Geocompuesto impermeabilizante	Residuos
Arcilla	18								
Arena	22	26							
Grava	24	30	35						
Geotextil agujado	28	28	27	20					
Geotextil termosold.	23	21	21	20	17				
PEAD rugoso	21	24	35	27	21	30			
PEAD liso	15	18	18	9	8	24	15		
Geocomp. Imperm.	30	30	28	22	20	30	16	25	
Residuos	30	30	32	25	19	30	12	25	35

Coeficientes aproximados de rozamiento entre materiales, según la norma UNE 104425

5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS - SUPERFICIES DESLIZAMIENTO

3-SUPERFICIE A LO LARGO DEL PAQUETE DE IMPERMEABILIZACIÓN

- *Resistencia al corte en las interfaces:*
 - Depende de
 - tipo de materiales
 - rigidez y textura en las dos caras
 - condiciones de humedad
 - regularidad de la superficie
 - factores relacionados con la colocación en obra y su control
 - El ángulo de rozamiento puede ser $< 8^\circ$ → incompatible con la inclinación de los taludes
 - Soluciones para ángulos de rozamiento bajos:
 - geomembranas rugosas o texturadas
 - geomallas de refuerzo



5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS - SUPERFICIES DESLIZAMIENTO

3-SUPERFICIE A LO LARGO DEL PAQUETE DE IMPERMEABILIZACIÓN

- *Resistencia al corte en las interfaces:*
 - *Resistencia de pico, residual, intermedia ¿?*
 - *Situación de cálculo:* normal, transitoria, excepcional; sismo
 - Niveles de deformación
 - Coeficientes de seguridad asociados

→ Resistencias de pico, junto con un factor de seguridad elevado, sería suficiente para asegurar la estabilidad



5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS - SUPERFICIES DESLIZAMIENTO

3-SUPERFICIE A LO LARGO DEL PAQUETE DE IMPERMEABILIZACIÓN

- *Interfaz geomembrana (GM)- geosintético bentonítico (GCL).*

Resistencias de pico, a presión normal 50 kPa:

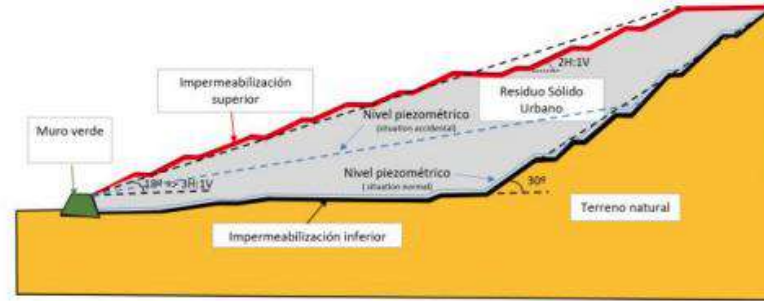
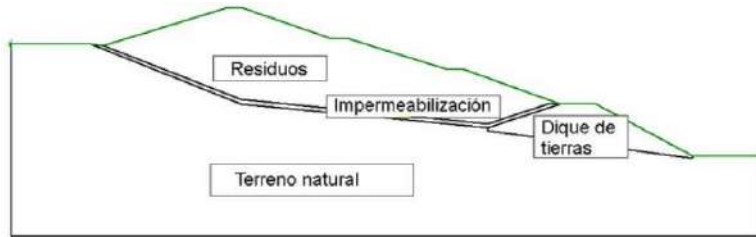
- *GCL tejido y GM **texturada**: $c = 6 \text{ kPa}$; $\phi = 19,5^\circ$*
- *GCL **no** tejido y GM **texturada**: $c = 16 \text{ kPa}$; $\phi = 23^\circ$*
- *GCL tejido y GM **lisa**: $c = 2,3 \text{ kPa}$; $\phi = 9,3^\circ$*
- *GCL **no** tejido y GM **lisa**: $c = 0,5 \text{ kPa}$; $\phi = 17^\circ$*
- *En general, la cohesión poco relevante*
- *Influencia de la hidratación de la bentonita → menor resistencia: ¡**Ensayos de laboratorio deben reproducir procesos y condiciones de obra!***



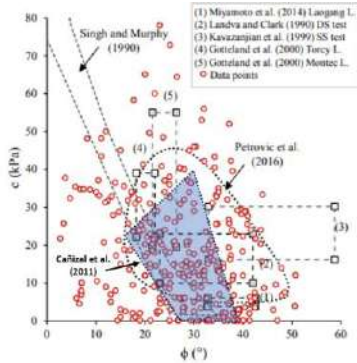
5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS

PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN LOS CÁLCULOS DE ESTABILIDAD

➤ Geometría del vertedero



➤ Resistencia al corte del residuo



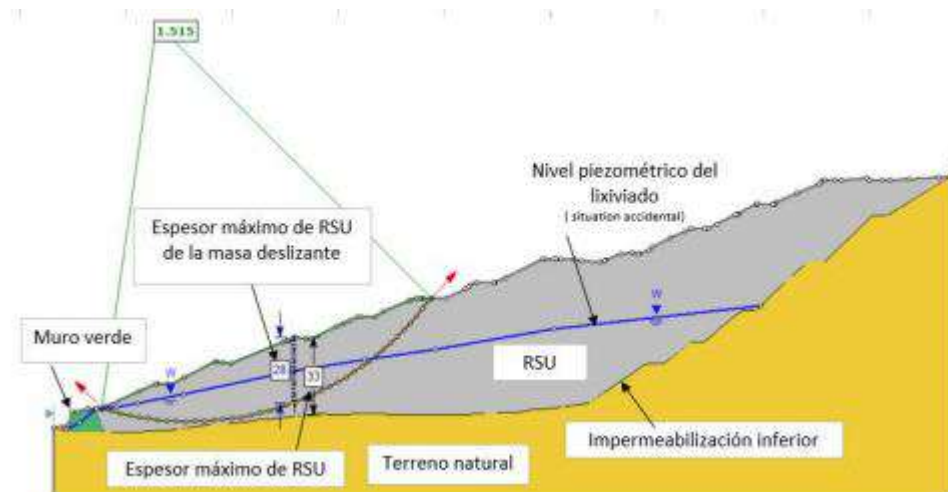
- Resistencia al corte de las diferentes capas del paquete de impermeabilización
- Resistencia de terreno de apoyo
- Nivel de **lixiviados** dentro de la masa del residuo

Industrial Waste
Anti-puncture geotextile
Geocomposite bentonite clay barrier
PEAD (double rough)
Drainage geocomposite
Natural ground

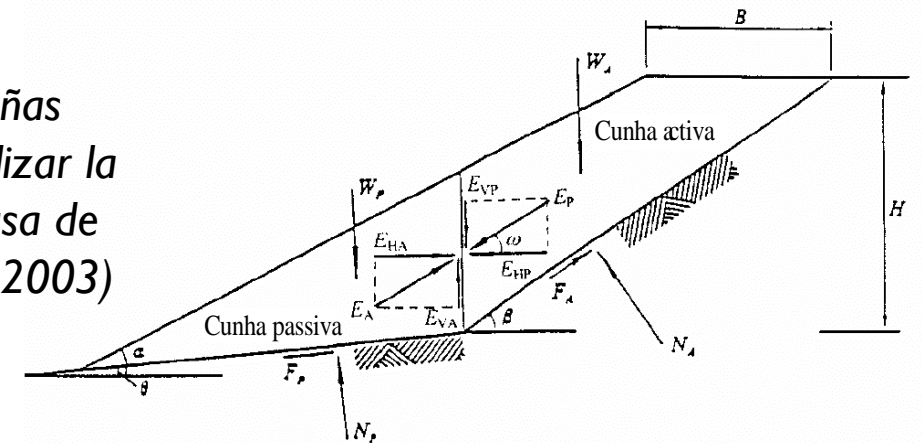
5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS - SUPERFICIES DESLIZAMIENTO

MÉTODOS DE CÁLCULO

- *Métodos de análisis de estabilidad de taludes:*
 - Métodos basados en los conceptos de **equilibrio límite**
 - de rebanadas; de cuñas; talud infinito o finito
 - Métodos numéricos: elementos finitos



*Método de dos cuñas
adyacentes para analizar la
estabilidad de la masa de
residuos (Qian et al., 2003)*



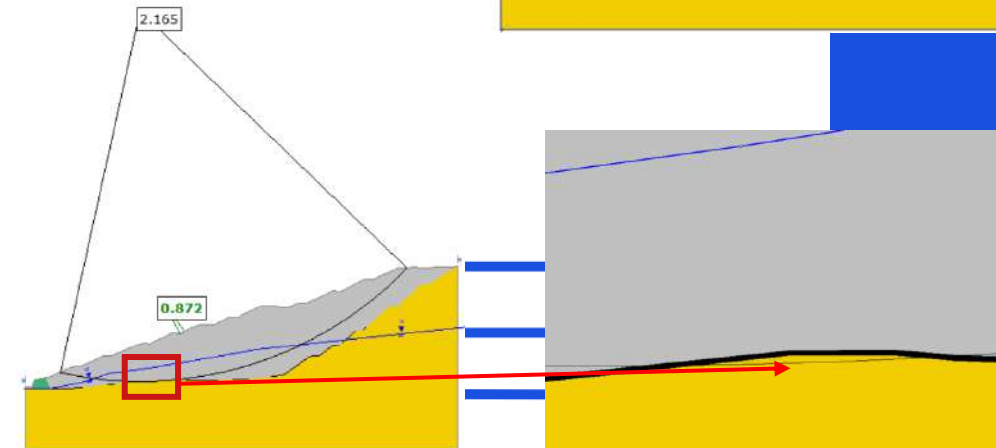
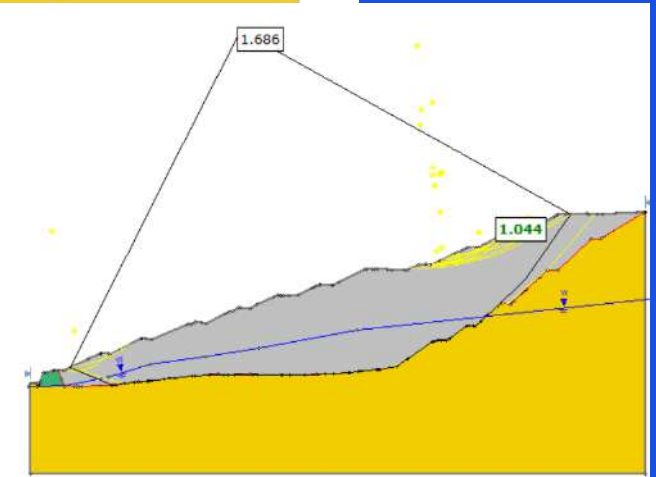
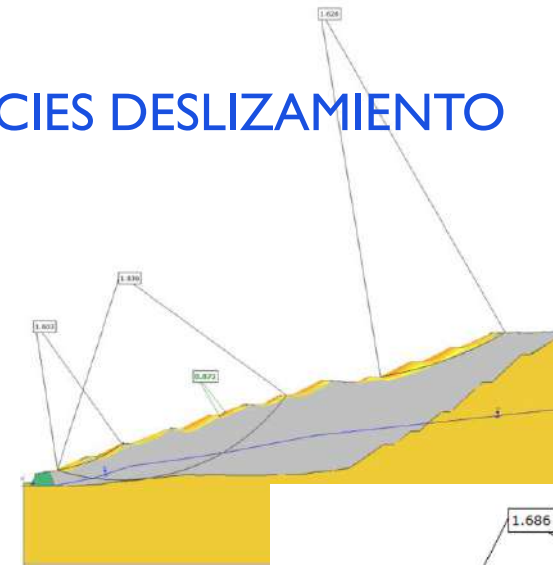
Deslizamiento circular

Morgenstern-Price (1965)

5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS - SUPERFICIES DESLIZAMIENTO

MÉTODOS DE CÁLCULO

- 1- Superficie de deslizamiento a través de la masa interna del residuo
 - superficie deslizamiento circular
 - paquete de impermeabilización y sustrato: “infinite strength”
 - => **Forzar a pasar sólo por la masa de residuo**
- 2- Superficie de deslizamiento a través del paquete de impermeabilización
 - superficies deslizamiento circular/”block search”
 - sustrato: “infinite strength”
 - => **Forzar a pasar por paquete de impermeabilización**
- 3- Superficie de deslizamiento conjunto vertedero-terreno
 - superficies deslizamiento circular
 - sustrato: con sus valores resistentes
 - => **Forzar a pasar por sustrato**



5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS – SITUACIONES DISEÑO

1- Situación normal: funcionamiento normal y correcto del vertedero.

No movimientos, todo OK en sistema recogida lixiviado

El **nivel piezométrico sólo** afecta a los residuos del **interior del vertedero**

2- Situación accidental: Rotura o el mal funcionamiento de algún elemento del vertedero (fallo del sistema de drenaje) [temporal].

Sistema de recogida de lixiviados se atasca o deja de funcionar => aumento inesperado del nivel de lixiviados en el interior de los residuos.

El **nivel piezométrico sólo** afecta a los residuos del **interior del vertedero**

3- Situación extraordinaria: Rotura o el mal funcionamiento de algún elemento del vertedero (rotura impermeabilización) [largo plazo].

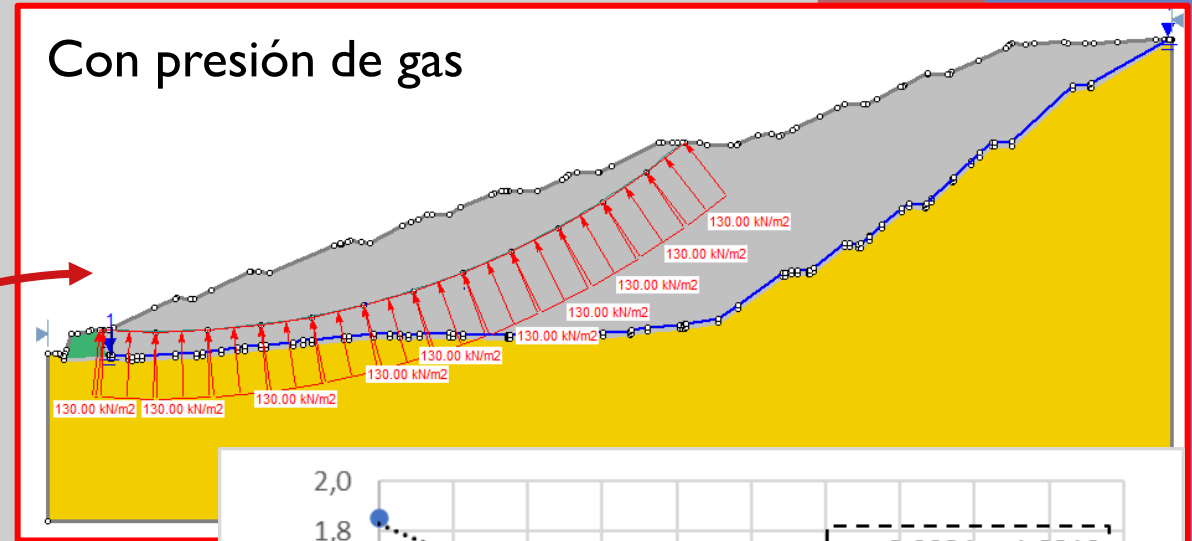
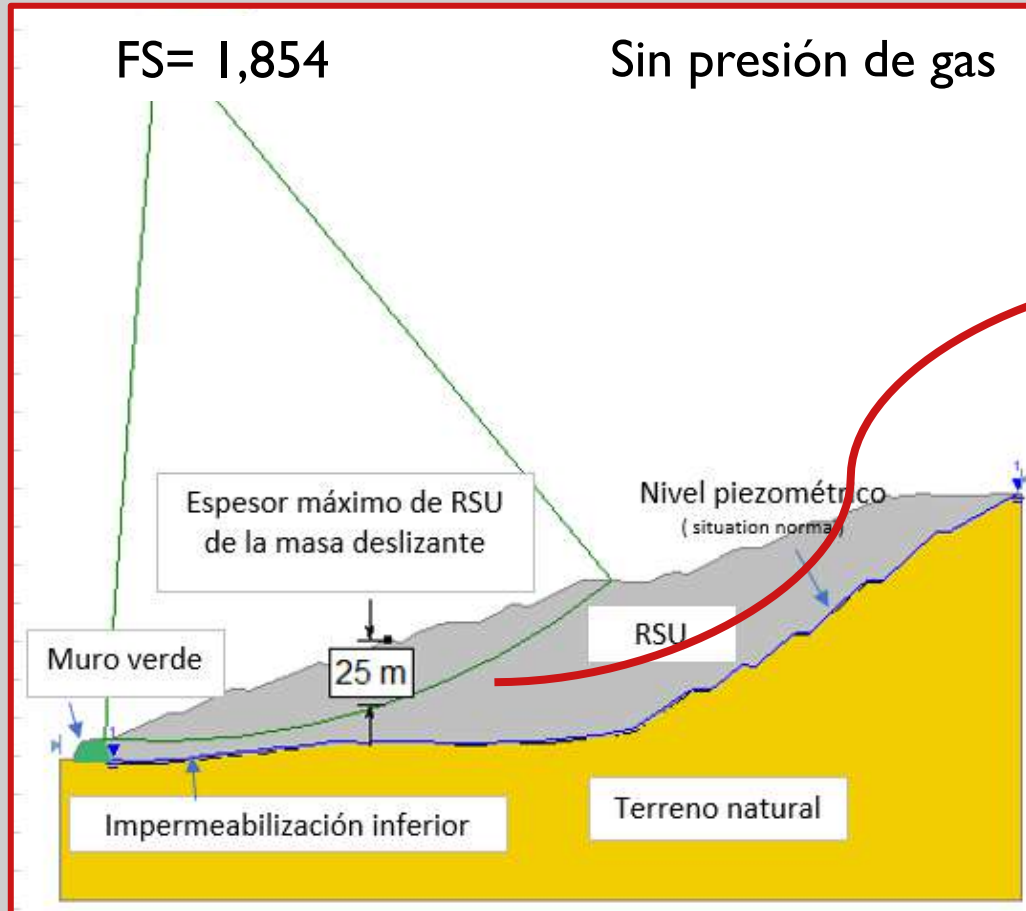
El lixiviado también genera presión en el paquete de impermeabilización

4- Situación sísmica: Vertedero en zona sísmica

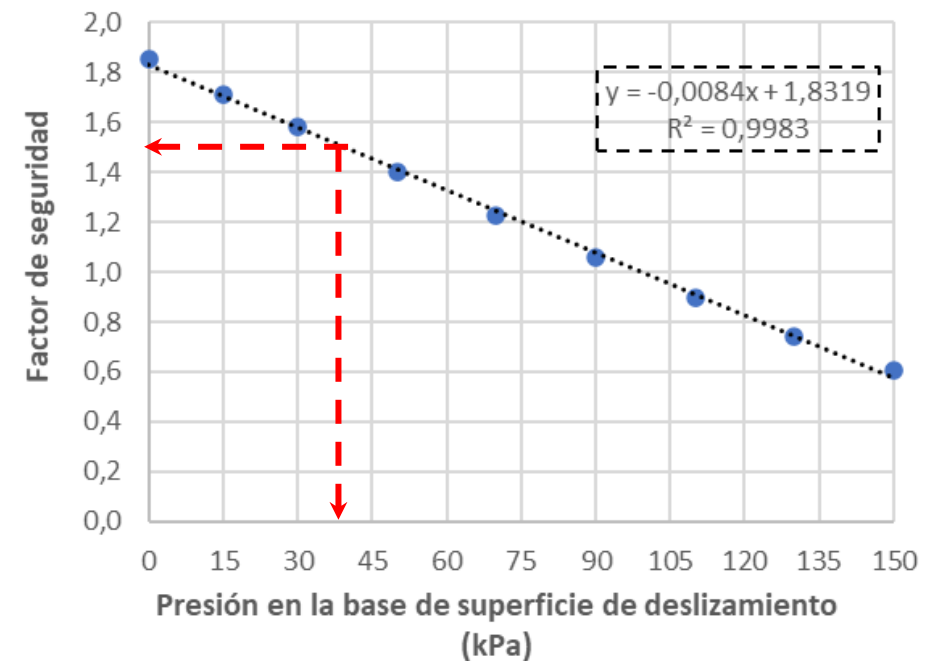
Cálculos pseudoestáticos con fuerzas horizontales y verticales inerciales para modelizar los efectos sísmicos

5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS – GAS

I- Situación Normal

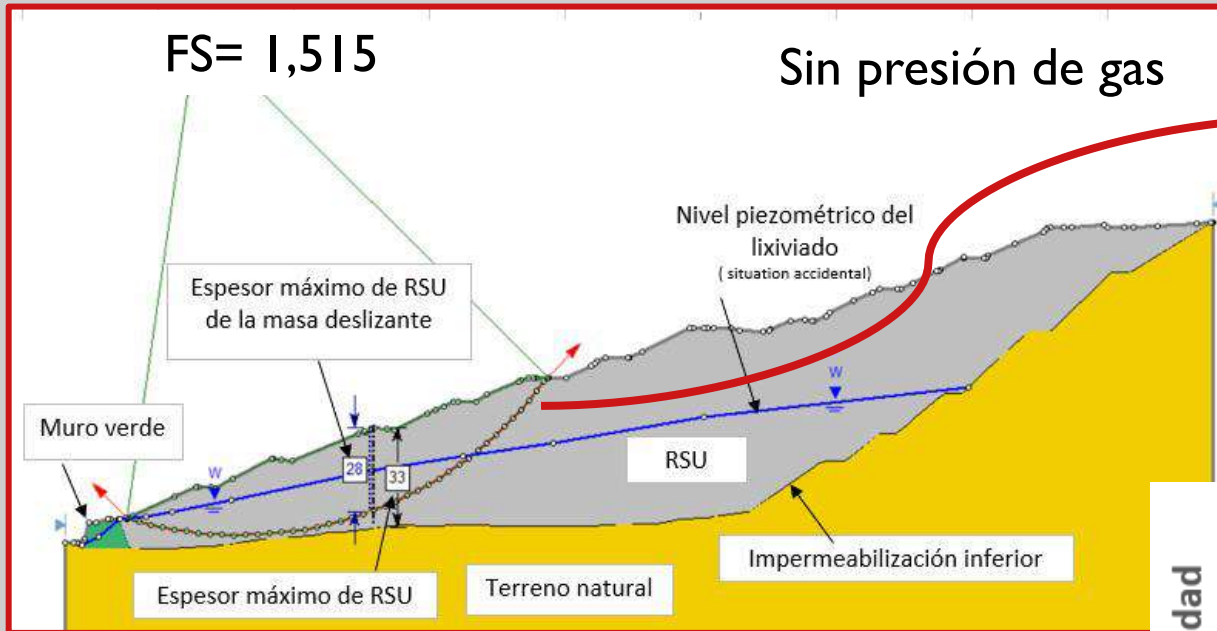


$$P_{\text{gas}} = 35 \text{ kPa} \Rightarrow \text{FS} = 1,3$$

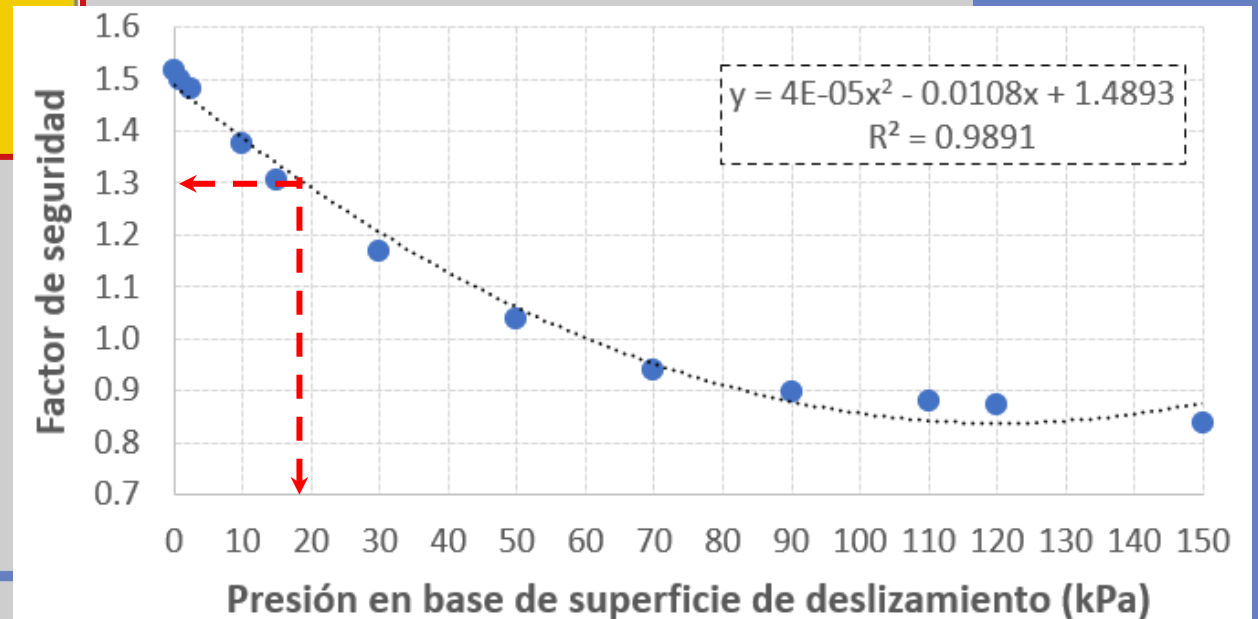
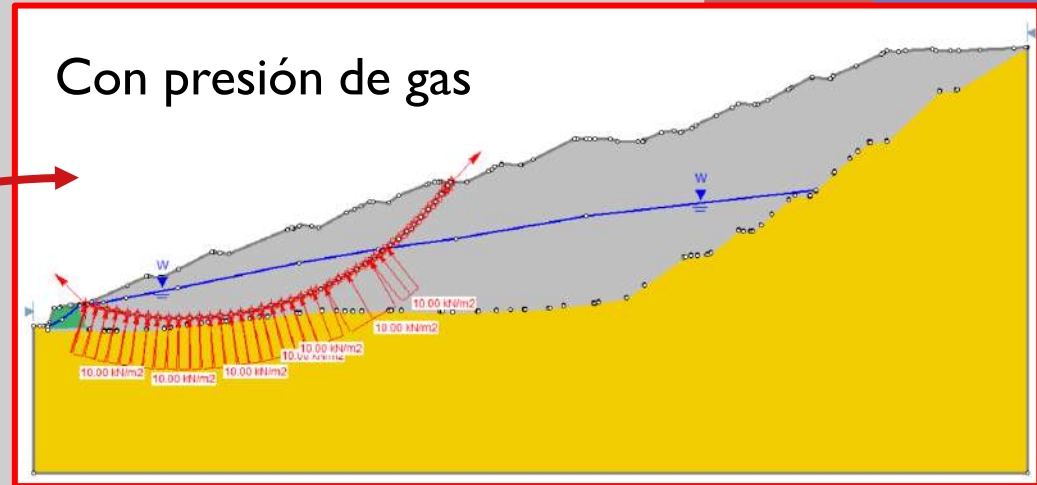


5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS – GAS

2- Situación Accidental



$$P_{\text{gas}} = 18 \text{ kPa} \Rightarrow \text{FS} = 1,3$$



5- ESTABILIDAD EN VERTEDEROS

ASPECTOS MÁS RELEVANTES EN LA ESTABILIDAD

- Características de los residuos: parámetros resistentes, peso específico.
- Posición del nivel freático/nivel de lixiviados, presencia de gas.
- Deslizamientos a favor del contacto con las superficies de impermeabilización.
- Parámetros resistentes en las interfaces más débiles (geomembranas,...).
- Deslizamientos de los sistemas de cobertura.
- Previsión de asientos.

6- CONTROL Y VIGILANCIA — EXPLOTACIÓN Y CLAUSURA

- Procedimientos de control y vigilancia de aguas, lixiviados y gases en las fases de explotación y de mantenimiento posterior (**Real Decreto 646/2020**):
 - **Control de las aguas superficiales**, si las hay, en un mínimo de dos puntos, uno aguas arriba del vertedero y otro aguas abajo.
 - **Control de gases**: deberá ser representativo de cada sección del vertedero, determinando el caudal y la composición de los gases del vertedero.

30 años tras clausura

Costes de:

Mantenimiento

Control

Emisión gases

invernadero

	Fase de explotación	Fase de mantenimiento posterior (1)
Volumen de los lixiviados.	Mensualmente (3) y (4).	Cada seis meses.
Composición de los lixiviados (2).	Trimestralmente (3).	Cada seis meses.
Volumen y composición de las aguas superficiales (7).	Trimestralmente (3) y (4).	Cada seis meses.
Emisiones potenciales de gas a presión atmosférica (CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , H ₂ S, H ₂ , etc.) (4).	Mensualmente (3) y (5).	Cada seis meses (6).

- **Protección de las aguas subterráneas**
- Toma de muestras de los **procedimientos de control** y vigilancia en las fases de explotación y mantenimiento posterior. **No dice nada del nivel piezométrico del vertedero!!**
- Topografía de la zona: datos sobre el vaso de vertido. **Control de hitos topográficos**

7- PATOLOGÍAS EN VERTEDEROS

a) Superficie de contacto entre vertedero y cimentación:

- Apoyo del revestimiento de fondo
 - Superficie regular y homogénea,
 - Si no lo es, capa de regularización de suelos compactados.
- Posibles heterogeneidades:
 - fracturas en superficies rocosas
 - capas de arena
 - zonas blandas en la cimentación
 - presiones hidrostáticas excesivas, superiores a las presiones de confinamiento



7- PATOLOGÍAS EN VERTEDEROS

a) Superficie de contacto entre vertedero y cimentación:



7- PATOLOGÍAS EN VERTEDEROS

a) Superficie de contacto entre vertedero y cimentación:

Tratamiento de heterogeneidades en el terreno de cimentación

HETEROGENEIDAD	PROBLEMAS	TRATAMIENTO
Fisuras en superficies rocosas	<ul style="list-style-type: none"> - Caminos preferenciales para fuga de lixiviados - Erosión interna 	<ul style="list-style-type: none"> - Inyecciones de fracturas y fisuras
Capas y vetas de arena	<ul style="list-style-type: none"> - Caminos preferenciales para fuga de lixiviados - Erosión interna 	<ul style="list-style-type: none"> - Sellado con capas de arcilla compactada
Zonas blandas	<ul style="list-style-type: none"> - Asientos diferenciales - Tensiones inadmisibles 	<ul style="list-style-type: none"> - Eliminación y substitución - Tratamiento de mejora de suelo
Presiones intersticiales excesivas	<ul style="list-style-type: none"> - Fisuración del revestimiento - Filtraciones 	<ul style="list-style-type: none"> - Zanjas de drenaje - Pozos de bombeo - Pantallas impermeables

7- PATOLOGÍAS EN VERTEDEROS

b) Sistema de cobertura:

- Frecuentes problemas de deslizamiento de la cobertura
 - Potenciales fuerzas desestabilizadoras:
 - peso de las capas,
 - fuerzas de percolación,
 - cargas sísmicas,
 - sobrecargas de equipamientos, etc.
 - Rotura por falta de adecuada resistencia al corte interfacial
 - Deficiente funcionamiento del drenaje en la cobertura
 - Falta de protección contra la erosión superficial



7- PATOLOGÍAS EN VERTEDEROS

b) Sistema de cobertura:



Erosión superficial



7- PATOLOGÍAS EN VERTEDEROS

b) Sistema de cobertura:



Erosión superficial



7- PATOLOGÍAS EN VERTEDEROS

b) Sistema de cobertura:

Fuga de lixiviados



7- PATOLOGÍAS EN VERTEDEROS

b) Sistema de cobertura:



Deslizamientos

7- PATOLOGÍAS EN VERTEDEROS

b) Sistema de cobertura:

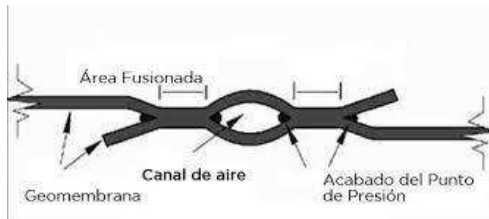
- Soluciones:
 - selección adecuada de los parámetros resistentes de los materiales y de las interfaces
 - modificación de la inclinación de los taludes
 - selección del tipo adecuado de geomembranas (rugosas) y otros materiales
 - introducción de elementos de refuerzo
 - diseño adecuado del sistema de drenaje
- En general: utilización de taludes suaves provistos de bermas intermedias
- Taludes exteriores, normalmente: IV:2,5H a IV:3H, generalmente, en relación con la resistencia al corte de los residuos



7- PATOLOGÍAS EN VERTEDEROS

c) Geosintéticos:

- La mayor parte asociadas al proceso de colocación
 - el control es básico
 - planes de garantía de la calidad del control
- Fundamental garantizar la continuidad de las geomembranas
 - certificados del fabricante
 - soldaduras: ensayos de verificación
 - dos tipos de soldadura:
 - Doble; soldaduras entre paneles; inyección de aire a presión en el canal
 - Simple, por extrusión; limitada a zonas pequeñas, remiendos, reparaciones
 - inspección visual



7- PATOLOGÍAS EN VERTEDEROS

c) Geosintéticos:

Geomembranas:

Factores que inspeccionar	Método de inspección
espesor	- ensayo destructivo
comportamiento a tracción	- ensayo destructivo
resistencia al rasgamiento	- ensayo destructivo
manejo y almacenamiento	- observación
material de soldadura y equipos	- certificación del fabricante
juntas (i)	- ensayo destructivo
juntas (ii)	- ensayo no destructivo
anclaje	- observación
doblecres y arrugas	- observación
cubrición	- observación

7- PATOLOGÍAS EN VERTEDEROS

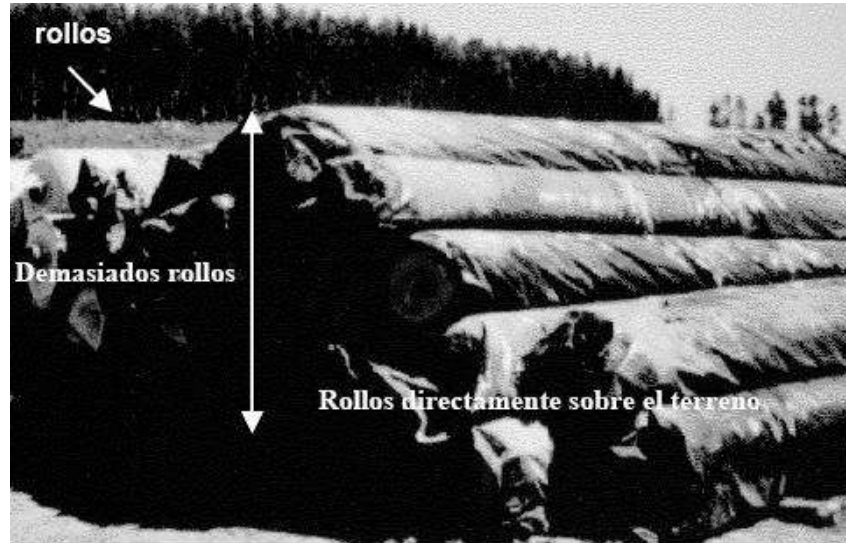
c) Geosintéticos:

Factores constructivos causa de patologías en geosintéticos:

- **Inadecuada manipulación de los geotextiles en obra:**
 - *almacenamiento*
 - *transporte*
- **Problemas en juntas y soldaduras:**
 - *soldaduras por extrusión de geomembranas*
- **Problemas en los anclajes temporales**
 - *doblecetes, arrugas*
- **Problemas de estabilidad interna**
 - *deslizamientos por insuficiente resistencia al corte en interfaces*
- **Daños por punzonamiento**
 - *presencia de objetos extraños*
- **Exposición al sol**
 - *degradación por rayos ultravioletas*

7- PATOLOGÍAS EN VERTEDEROS

c) Geosintéticos:



7- PATOLOGÍAS EN VERTEDEROS

c) Geosintéticos:

Arrugas en la
geomembrana
en la base del
talud



7- PATOLOGÍAS EN VERTEDEROS

d) Asientos y desplazamientos diferenciales:

- *Causas:*
 - en el revestimiento inferior:
 - desigualdades en la consistencia del terreno de cimentación
 - la compresión de los residuos puede originar tracciones no deseables
 - en la cobertura:
 - descomposición localizada de residuos
 - migración de materiales finos
 - heterogeneidad de compresibilidad de los residuos
 - colapsos puntuales
 - recrecimiento del vertedero

→ Las capas de revestimiento deben ser capaces de resistir estos esfuerzos y adaptarse a los movimientos diferenciales

7- PATOLOGÍAS EN VERTEDEROS

e) Vías de acceso:

Vías internas de acceso a las células

Sirven para el transporte:

De materiales de construcción

De residuos

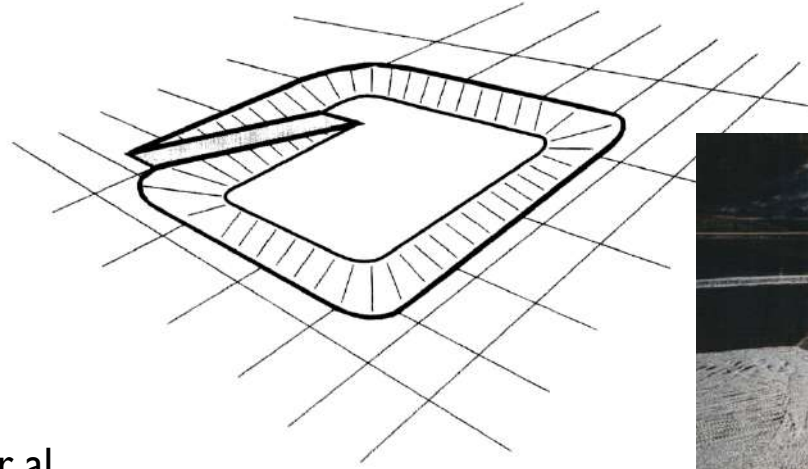
Problemas:

Pendientes considerables: rampas para acceder al fondo de las células

Cargas de tráfico elevadas; acciones de frenado

El sistema de revestimiento debe pasar por debajo del pavimento

Posibilidad de daños durante las fases de construcción y de operación



7- PATOLOGÍAS EN VERTEDEROS

e) Vías de acceso:

Recomendaciones:

- Anchura mínima: 5 m.
- Inclinación longitudinal: $< 12 \%$
- Espesor de pavimento: $> 0,6\text{m}$ (por encima del revestimiento)
- Material:
 - de granulometría extensa, tipo SW o GW, de machaqueo
 - ¡Cuidado con la posibilidad de punzonamiento del revestimiento!
 - Evitar materiales excesivamente erosionables
- Posibilidad de elemento de refuerzo (geotextil, geomalla)
- Atención al drenaje en caminos a medio talud:
 - acumulación de aguas procedentes de la capa de drenaje de lixiviados
 - colocar dren en el encuentro de la rampa con el pie del talud superior

7- PATOLOGÍAS EN VERTEDEROS

ATENTOS A LAS PATOLOGIAS
MUCHAS VECES EL VERTEDERO AVISA DE P



16 DÍAS ANTES DIJO QUE ERA ESTABLE

El vertedero de Zaldibar detectó grietas días antes del derrumbe, según ha reconocido tras el siniestro

Solo 16 días antes de la avalancha en el vertedero de Zaldibar, la empresa gestora presentó a funcionarios del Gobierno vasco un informe que garantizaba su estabilidad. Sin embargo, uno de los trabajadores desaparecidos advirtió dos días antes de la catástrofe del peligro pero nadie le atendió.

8- CONCLUSIONES

- Vertedero.- Instalación, tratamiento residuos, aislamiento medio
- Legislación española: RD 646/2020
 - 3 tipos de vertederos
 - Define estructura para asegurar aislamiento
 - Define controles durante ejecución y tras clausura
 - Exige estudiar la estabilidad
- Estructura geotécnica compleja
 - Multitud de elementos
 - Diferentes funciones
 - Características de los residuos vs suelos
- Geosintéticos
 - Diferentes tipos
 - Diferentes funciones
 - Importantes en la estabilidad – Superficies de deslizamiento

8- CONCLUSIONES



- Estudio de Estabilidad
 - 3 Superficies de deslizamiento a estudiar (conjunto vertedero-terreno, masa residuo, impermeabilización)
 - 3-4 Situaciones de cálculo (normal, accidental, extraordinaria, símica)
 - Establecer FS límites
 - Caracterización geotécnica del residuo
- Controles durante ejecución y tras clausura
- Patologías muy diversas asociadas a las diferentes estructuras del vertedero



María Santana Ruiz de Arbulo

Maria.S.Ruiz@cedex.es

CEDEX

 CEDEX_es  CEDEX