

Criterios de estabilidad en el diseño de un vertedero, basado en la normativa española

JOSÉ ESTAIRE GEPP (*) y FERNANDO PARDO DE SANTAYANA (**)

RESUMEN El diseño de un vertedero requiere la realización de un conjunto de análisis de estabilidad. Para llevar a cabo dichos análisis es necesario definir distintas situaciones de cálculo y sus correspondientes factores de seguridad. Por otra parte, en la construcción de vertederos normalmente se emplean geosintéticos para el revestimiento, lo que da lugar a superficies de deslizamiento críticas situadas en los contactos entre los distintos geosintéticos empleados, por lo que la determinación de la resistencia al corte de dichas superficies constituye un objetivo de extrema importancia.

En el presente artículo se analizan estos aspectos teniendo en cuenta lo establecido en la normativa española y en la bibliografía técnica. Como resultado del estudio, se presentan algunas tablas en las que se relacionan las distintas situaciones de cálculo (normal, accidental y extraordinaria) con la resistencia al corte del sistema de impermeabilización (pico o residual) y se define el factor de seguridad mínimo requerido.

STABILITY ANALYSIS CRITERIA IN LANDFILL DESIGN BASED ON THE SPANISH CODES

ABSTRACT *The design of a landfill requires performing stability analyses. To perform such analyses it is necessary to define different design situations and their corresponding safety factors. Geosynthetics are normally used to construct the lining system of the landfills, causing critical slip surfaces to pass along one of the different geosynthetic interfaces. Determination of the shear strength of such critical interfaces is, therefore, an extremely important issue.*

In this paper, these aspects are analysed based on what is set in the Spanish codes and in the technical literature. As a result of the study, some tables are presented which relate the different design situations (normal, accidental or extraordinary) to the shear strength of the lining system to be used (peak or residual) and define the minimum factor of safety to be accomplished.

Palabras clave: Vertederos, Estabilidad, Factores de seguridad.

Keywords: Landfill, Stability, Safety factors.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de estabilidad es uno de los aspectos más importantes a considerar en el diseño de un vertedero. Para llevar a cabo dicho análisis es necesario definir diferentes situaciones de cálculo que puedan ocurrir durante la vida del vertedero.

Estas situaciones de cálculo tienen una probabilidad de ocurrencia diferente por lo que en cada cálculo debe aplicarse un factor de seguridad específico.

Otro problema clave en este tipo de análisis corresponde a la elección de la resistencia al corte de las interfaces existentes en el sistema de impermeabilización, ya que, por un lado es necesario elegir entre resistencia al corte en condiciones de

pico o residual, y por otro, elegir entre la resistencia obtenida en ensayos de laboratorio llevados a cabo en condiciones secas o en condiciones en las que haya presencia de agua.

Este artículo trata sobre estos aspectos y propone un marco conceptual para llevar a cabo dichos análisis de estabilidad.

Este marco conceptual puede ayudar a definir la normativa española relativa al diseño de vertederos (Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001) que está actualmente en fase de borrador.

2. RESISTENCIA AL CORTE DEL SISTEMA DE REVESTIMIENTO

2.1. RESISTENCIA AL CORTE PICO O RESIDUAL DEL CONTACTO ENTRE GEOSINTÉTICOS

Las curvas de resistencia al corte – desplazamiento horizontal obtenidas en los ensayos de corte directo realizados en la interfaz de las capas del sistema de revestimiento presentan normalmente un pico bien definido seguido por una marcada

(*) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de Área de Geotecnia Básica y Experimental. Laboratorio de Geotecnia (CEDEX), Madrid, Spain. E-mail: Jose.Estaire@cedex.es

(**) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director del Laboratorio de Geotecnia (CEDEX), Madrid, Spain. Vocal de IGS España. E-mail: F.Pardo.S@cedex.es

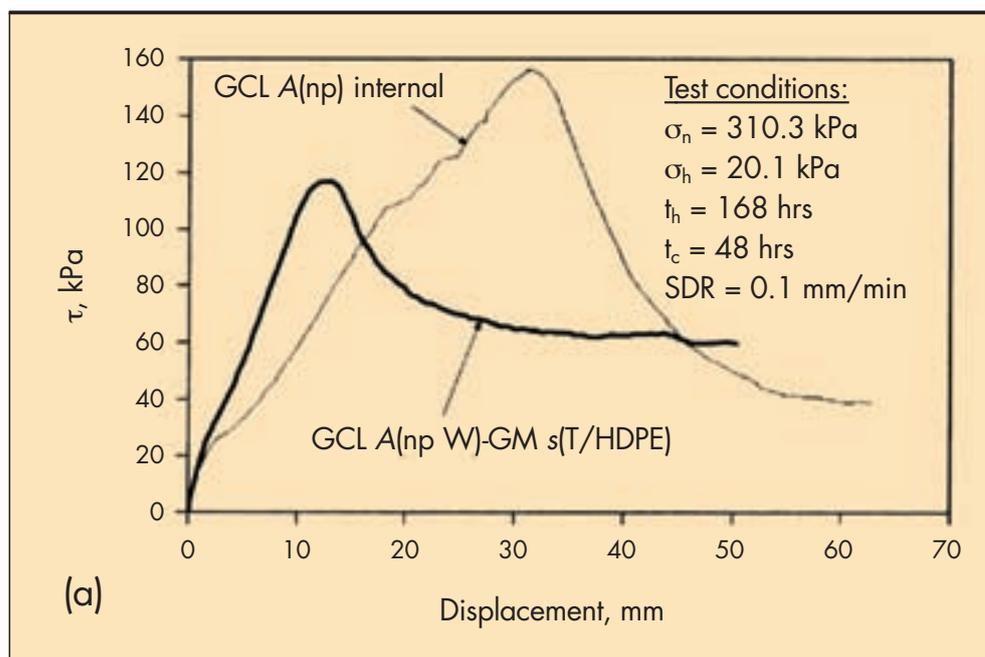


FIGURA 1. Curvas de resistencia al corte – desplazamiento horizontal obtenidas en ensayos de corte directo realizados en la interfaz de geosintéticos. (tomado de Mc Cartney, 2009).

disminución a medida que progresa el desplazamiento. (Figura 1).

La elección de la resistencia al corte del sistema de impermeabilización a utilizar en los cálculos así como su relación con el valor del factor de seguridad son temas de gran importancia que ya han sido ampliamente discutidos en la literatura técnica como se muestra a continuación:

- Stark y Poeppel (1994) recomiendan llevar a cabo los análisis de estabilidad del vertedero teniendo en cuenta los siguientes criterios:
 - Utilizar la resistencia al corte residual en los taludes laterales y la resistencia pico en la base, con un factor de seguridad de 1,5.
 - Utilizar la resistencia residual tanto en los taludes laterales como en la base, con un factor de seguridad por encima de 1,0.
- Filz *et al.* (2001) señalan que, cuando se utilice la resistencia de pico es necesario considerar un factor de seguridad por encima de 2,0, mientras que cuando se considere la resistencia residual, ese factor de seguridad debe multiplicarse por el coeficiente de reducción siguiente (FR):

$$FR = \frac{\tau_r}{[\tau_r + 0,1 \cdot (\tau_p - \tau_r)]}$$

donde τ_r es la resistencia residual y τ_p es la resistencia de pico. El uso de esta expresión implica por ejemplo, un factor de reducción de 0,75 si la resistencia residual es un 25 % de la resistencia pico.

- Richard Thiel (2001) recomienda utilizar la resistencia residual cuando las operaciones de ejecución o las condiciones de diseño favorezcan la presencia de desplazamientos relativos en las capas del sistema de impermeabilización. Esto puede ocurrir cuando la geometría del vertedero implique una distribución de esfuerzos no uniforme o cuando aparezcan cargas debidas a sismo.

Este autor añade a esta regla general las siguientes recomendaciones:

- El supuesto más conservador consiste en considerar que el plano de deslizamiento se desarrolla, en todas las zonas del vertedero, en la interfaz geomembrana-geocompuesto bentonítico y que en dicha interfaz se desarrolla la resistencia residual. Esta aproximación se restringe a las membranas lisas, no texturizadas.
- Una aproximación híbrida consiste en utilizar los valores de resistencia residual en los taludes laterales y la resistencia de pico en la base, considerando un factor de seguridad para el diseño final de 1,5, asumiendo que no se producirán incrementos de tensión intersticial inesperados, y de 1,3 durante la construcción y operaciones de relleno del vertedero.
- También pueden hacerse los cálculos utilizando una resistencia post-pico, superior a la resistencia residual, asociada a ciertos niveles de deformación. De hecho, las deformaciones relativas durante la construcción y operaciones de relleno del vertedero son menores que las necesarias para alcanzar la resistencia residual.
- Por último, recomienda el uso de geomembranas texturizadas con el fin de incrementar la resistencia al corte de las interfaces. En este caso, si el análisis sísmico no muestra deformaciones significativas, el cálculo puede realizarse incluso con la resistencia de pico y teniendo en cuenta un factor de seguridad adecuado.
- Koerner y Bowman (2003), después de revisar 40 casos reales de deslizamientos ocurridos en vertederos, concluyen que la mayoría de tales deslizamientos se produjeron debido a aumentos inesperados de la presión intersticial provocados por fallos en el sistema de drenaje, más que a un problema derivado de una mala elección entre resistencia pico o residual. Basándose en esta

conclusión, los autores determinan que si el sistema de drenaje funciona correctamente, la resistencia residual sólo debe utilizarse en los diseños en zonas sísmicas activas y en casos particulares en los que se prevean importantes deformaciones.

Por tanto, resumiendo estas referencias, se puede concluir que la decisión de utilizar la resistencia pico o residual, o un valor intermedio, debe llevarse a cabo teniendo en cuenta la situación concreta de diseño, y se debe combinar el valor de resistencia considerado con un factor de seguridad apropiado.

2.2. CONDICIONES SECAS O HÚMEDAS EN LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO

Otro problema importante es determinar si los ensayos de corte deben realizarse en condiciones secas o húmedas, a fin de conseguir una mejor simulación de las condiciones reales en la que se va a encontrar el sistema de impermeabilización del vertedero.

En general, si se supone que la capa impermeable (geomembrana) funciona correctamente, la interfaz entre la geomembrana y la capa de geobentonita subyacente estará en condiciones secas. Sin embargo, pueden considerarse condiciones saturadas si se produce una rotura del sistema de impermeabilización.

3. SITUACIONES DE DISEÑO

Las situaciones de diseño para los análisis de estabilidad pueden clasificarse en tres categorías: normal, accidental y extraordinaria.

3.1. SITUACIÓN NORMAL

Esta situación corresponde a la operatividad normal del vertedero, lo que implica que no se han producido movimientos significativos y que el nivel piezométrico es el correspondiente a un funcionamiento normal del sistema de extracción del lixiviado.

3.2. SITUACIÓN ACCIDENTAL

Se considera una situación accidental aquella que se produce por la rotura o mal funcionamiento de algún elemento del vertedero, tales como:

a.- Fallo en el sistema de drenaje:

Esta situación implica las condiciones siguientes: que el sistema de extracción del lixiviado deje de funcionar y, como consecuencia de ello, se produzca un aporte de agua al interior del vertedero y que el nivel piezométrico suba hasta que se desborde por la parte superior del dique de tierras.

b.- Rotura del paquete de impermeabilización

Esta situación implica, a efectos de cálculo, que la superficie de todos los contactos entre las diferentes geomembranas y las capas de geobentonita, y la propia capa de geobentonita vayan a estar saturadas.

3.3. SITUACIÓN EXTRAORDINARIA

Se trata de situaciones con una probabilidad de ocurrencia muy baja, tales como:

a.- Rotura generalizada

Esta situación puede producirse como consecuencia de una situación accidental prolongada de rotura del sistema de impermeabilización, si no se toman medidas para repararla. Bajo estas circunstancias, debido al peso del relleno, pueden inducirse movimientos en las diferentes capas del sistema de impermeabilización que a su vez provoquen movimientos en los propios residuos llegando a una situación de grandes movimientos generalizados asimilables a una rotura generalizada en el vertedero.

b.- Análisis sísmico

Esta situación supone realizar un cálculo pseudo-estático que incorpora el efecto sísmico a través de la consideración, en el cálculo, de fuerzas de inercia adicionales, tanto horizontales como verticales, proporcionales a la aceleración sísmica correspondiente.

3.4. SUPERFICIES DE DESLIZAMIENTO ANALIZADAS

Todas las situaciones de cálculo descritas anteriormente, deben analizarse para las superficies de deslizamiento que se indican a continuación, tal y como se recomienda en el borrador del código español.

- Superficies de deslizamiento entre el vertedero y el terreno natural de apoyo.
- Superficies de deslizamiento existentes en la masa de residuos del vertedero
- Superficies de deslizamiento en el paquete de impermeabilización, suponiendo la resistencia al corte más baja.

3.5. PROPUESTA SOBRE LA RESISTENCIA DEL PAQUETE DE IMPERMEABILIZACIÓN A UTILIZAR EN CADA SITUACIÓN DE CÁLCULO

Teniendo en cuenta la definición de cada situación de cálculo, la Tabla 1 muestra una propuesta de la relación entre cada situación de cálculo y la resistencia del paquete de impermeabilización a utilizar en el análisis de estabilidad.

Situación de cálculo		Resistencia del paquete de impermeabilización
Normal	Operatividad normal del vertedero	Pico y seca
Accidental	Fallo del sistema de drenaje	Pico y seca
	Rotura imprevista del paquete de impermeabilización	Pico y húmeda
Extraordinaria	Rotura generalizada	Residual y húmeda
	Análisis sísmico	Residual y seca

TABLA 1. Resistencia del paquete de impermeabilización a utilizar en los cálculos de estabilidad para cada situación de cálculo.

Riesgo	Tipo de residuo		
	Inerte	No peligroso	Peligroso
Bajo	1.3	1.4	1.5
Medio	1.4	1.5	1.6
Alto	1.5	1.6	1.8

TABLA 2. Valores de los factores de seguridad indicados en el borrador del "Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001".

4. FACTOR DE SEGURIDAD MÍNIMO

4.1. VALORES PROPUESTOS POR EL BORRADOR DEL CÓDIGO ESPAÑOL

Actualmente en España, el único documento oficial que hace alguna referencia a los valores de los factores de seguridad a utilizar en los análisis de estabilidad que se deben efectuar en el proyecto de un vertedero, es el borrador del "Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001". Los valores, para situaciones estáticas, están en función de las consecuencias de una potencial inestabilidad y del tipo de residuo tal como se recoge en la Tabla 2.

Las situaciones de riesgo bajo son aquellas en las que sólo se producirían daños materiales sin consecuencias medioambientales significativas. Las de riesgo medio implican daños ambientales significativos, mientras que las de riesgo alto son aquellas en las que se podrían provocar daños humanos y medioambientales irreversibles.

Además, el código indica un valor mínimo de 1,4 para vertederos con residuos peligrosos y una reducción de 0,1 en los factores de seguridad correspondientes cuando se considere que existe un fallo en el sistema de drenaje.

4.2. DISCUSIÓN DE LOS VALORES PROPUESTOS

A continuación se realiza una revisión crítica de los valores propuestos en el borrador del Desarrollo Técnico, con ayuda de la norma española para grandes presas, ya que puede considerarse que estas estructuras se diseñan en condiciones muy restrictivas debido al elevado riesgo potencial para las personas y el medio.

En España, la actual norma en el campo del cálculo de presas corresponde al "Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses" (1996), que se utiliza con ayuda de la guía técnica "Guía Técnica n°1 - Seguridad de Presas".

El "Reglamento" clasifica las situaciones de cálculo en normal, accidental y extrema, en función del riesgo y la duración, y la "Guía" define estas situaciones de la siguiente forma:

- Situaciones normales: se supone que el embalse está lleno al máximo nivel normal y las presiones intersticiales en el núcleo y cimiento alcanzan valores normales.
- Situaciones accidentales: son aquellas que tienen una duración limitada, por lo que se recomienda incluir todas las situaciones transitorias que se dan durante la construcción y durante el periodo de explotación tales como: desembalse rápido, fallo en el sistema de drenaje, situación sísmica con el embalse lleno y terremoto de proyecto.
- Situaciones extremas: son aquellas que tienen una probabilidad de ocurrencia baja, como situaciones sísmicas

Situación de cálculo	Factor de seguridad
Normal	1.4
Accidental	1.3
Extrema	>1.0

TABLA 3. Factores de seguridad recomendados en la "Guía Técnica de Seguridad de Presas" para grandes presas.

con el embalse lleno al nivel normal y terremoto extremo, o situaciones con el embalse lleno a nivel de avenida extrema.

Para estas situaciones, la "Guía Técnica de Seguridad de Presas" recomienda que se empleen, para los cálculos de estabilidad, los factores de seguridad que se incluyen en la Tabla 3.

El análisis de los valores de la Tabla 3 muestra que el factor de seguridad para una situación normal es de 1,4 mientras que para las situaciones accidental y extrema dicho factor de seguridad se reduce 0,1 y 0,4 puntos respecto a la situación normal.

De la comparación entre las dos normativas españolas se extrae que la diferencia más significativa corresponde al factor de seguridad propuesto para las situaciones sísmicas, ya que en el Desarrollo Técnico es superior (1,4) al valor propuesto en la normativa de presas (entre 1,3 y 1,0).

4.3. PROPUESTA DE VALORES PARA LOS FACTORES DE SEGURIDAD

Teniendo en cuenta todos los aspectos comentados anteriormente, pueden realizarse las siguientes propuestas:

- Uso de la clasificación realizada en la Tabla 2 relativa al riesgo y tipo de residuos.
- Uso de los valores indicados en la Tabla 2 para situaciones normales.
- Uso de un coeficiente de reducción de 0,1 en el factor de seguridad para situaciones accidentales respecto al valor de la situación normal.

Los factores de seguridad que se proponen son, por tanto, los que se muestran en la Tabla 4.

Para situaciones extraordinarias, incluyendo situaciones sísmicas, se propone utilizar el mismo rango de valores utilizados en los cálculos de grandes presas (1,0 y 1,3) tal y como se muestra en la Tabla 5.

TABLA 4. Propuesta de valores para los factores de seguridad en situaciones accidentales.

Riesgo	Tipo de residuo		
	Inerte	No peligroso	Peligroso
Bajo	1.20	1.30	1.40
Medio	1.30	1.40	1.50
Alto	1.40	1.50	1.70

Riesgo	Tipo de residuo		
	Inerte	No peligroso	Peligroso
Bajo	1.05	1.10	1.20
Medio	1.10	1.20	1.25
Alto	1.20	1.25	1.30

TABLA 5. Propuesta de valores para los factores de seguridad en situaciones extraordinarias.

5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

- De acuerdo con la bibliografía, la decisión de utilizar la resistencia al corte en condiciones pico o residual, o un valor intermedio, en el paquete de impermeabilización, debe tomarse teniendo en cuenta la situación particular de cálculo, y combinando la resistencia con el factor de seguridad más adecuado.
- Para el sistema de impermeabilización, la selección de los parámetros de resistencia obtenidos a partir de ensayos de laboratorio llevados a cabo en condiciones secas o húmedas, debe realizarse en función de la situación de cálculo.
- Los análisis de estabilidad deben llevarse a cabo para las siguientes situaciones de cálculo: normal, accidental y extraordinaria.
- Se ha realizado una propuesta que relaciona la situación de cálculo con la resistencia del sistema de impermeabilización, que se recoge en la Tabla 1.
- Se ha realizado una propuesta que relaciona cada situación de cálculo con su correspondiente factor de seguridad, tal como se muestra en las Tablas 2, 4 y 5.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores del artículo desean agradecer a Gracia Olivenza su apoyo para la realización del presente trabajo.

7. REFERENCIAS

- Filz, G.M., Esterhuizen, J.B. & Duncan, J.M. 2001. Progressive failure of lined waste impoundments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, ASCE. Vol. 127, N° 10, Oct.: 834-840).
- Guía Técnica nº 1 “Seguridad de Presas”.2005. *Comité Nacional Español de Grandes Presas (CNEGP)*.
- Koerner, R.M. & Bowman, H.L. 2003. A recommendation to use peak shear strengths for geosynthetic interface design. *GFR Magazine*. April 2003.
- Mc Cartney, J.S., Zornberg, J.G. & Swan, R.H. Analysis of a large database of GCL-Geomembrane Interface Shear Strength Results. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. Vol. 135, N° 2, Feb.: 209-223-615.
- Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses. 1996. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.
- Stark, T.D. & Poeppel, A.R. 1994. Landfill liner interface strengths from torsional ring shear tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. Vol. 120, N° 3, Mar.: 597-615.
- Subdirección General de Calidad Ambiental, 2003. Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001 relativo a las instalaciones de vertido de residuos. Rv.07. Documento de Trabajo.
- Thiel, R. 2001. Peak vs residual shear strength for landfill bottom liner stability analyses. *Proceedings of the 15th Annual GRI Conference Hot Topics in Geosynthetics. II Geosynthetics Institute*. Folsom, PA,: 40-70.



Geosintéticos



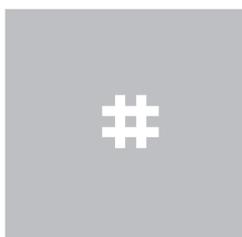
fabricados a medida



para obra civil



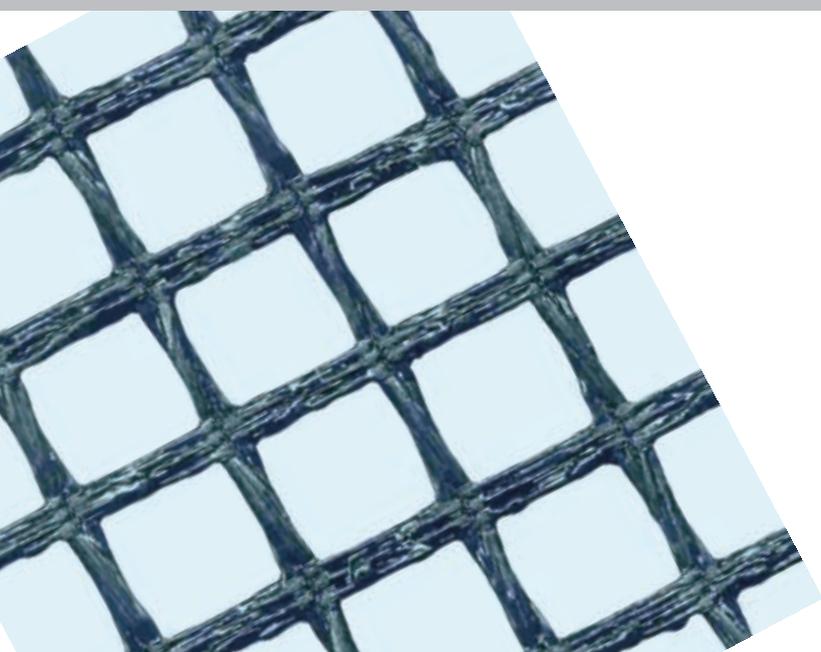
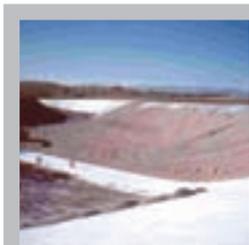
y textiles técnicos



para agricultura



e industria en general



HUESKER
Ideas. Ingenieros. Innovación.

Pol. Industrial Talluntxe II
Calle O, Nave 8. 31110 Noain (navarra)
Tel.: 948 198606
Fax: 948 198157
huesker@huesker.es
www.huesker.com

