

Aspectos geotécnicos de los rellenos sanitarios en México

Natalia Parra Piedrahita & Efraín Ovando Shelley
Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Circuito Escolar, Edificio 4, Cubículo 112, Delegación Coyoacán, C.P.04510, México, D.F., México
Mario Trigo Lara & René Contreras
TGC Geotecnia, Consultores Geotécnicos, México, D.F., México



RESUMEN

El propósito de este artículo es discutir los aspectos geotécnicos que se deben considerar en las distintas etapas de la vida de un relleno sanitario. Bajo este esquema la normatividad mexicana presenta algunas deficiencias. Se describen los aspectos relevantes que contemplan los rellenos sanitarios en sus distintas etapas: diseño, construcción, operación y clausura. Luego se presentan los análisis de una prueba de carga de grandes dimensiones en un relleno sanitario sobre suelos blandos. A partir de estos se proponen aspectos geotécnicos que se deben involucrar en la construcción y operación de rellenos sanitarios sobre suelos blandos. Este artículo proporciona lineamientos para mejorar la práctica de la disposición final de residuos sólido, útiles para los diseñadores, administradores y entidades reguladoras de rellenos sanitarios.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to discuss the geotechnical aspects that should be considered along the lifetime of a sanitary landfill, throughout the different stages of its development. As pointed out here, the Mexican environmental regulation presents some weaknesses in this respect. The authors discuss the most relevant aspects to be considered in the design, construction, operation and closure and then describe the results of the analyses of a large scale load test performed on a landfill on very soft soil. As a result, geotechnical aspects that should be involved in the construction and operation of landfills on soft soil are suggested. This article is intended to provide guidelines to improve the waste disposal practice, useful for designers, administrators and governmental agencies.

1 INTRODUCCIÓN

La norma NOM-083 SEMARNAT 2003, regula desde el punto de vista ambiental, el diseño, construcción, operación y clausura de rellenos sanitarios en México. Bajo este esquema la normatividad mexicana no tiene en cuenta los aspectos que competen a la seguridad geotécnica de rellenos sanitarios. De acuerdo a los registros de SEMARNAT existen alrededor de 650 tiraderos a cielo abierto y 200 sitios controlados. De este panorama solo nueve sitios siguen aproximadamente los lineamientos de la norma ambiental: Monterrey, Torreón, Tlanepantla, Mérida, Querétaro, Nuevo Ladero, San Juan del Río, Nogales y Durango y solo un relleno sanitario, la IV etapa de Bordo Poniente, se acerca a las exigencias internacionales de control geotécnico en rellenos sanitarios.

Normas internacionales como el Reglamento de la Comunidad Europea relativa al vertido de residuos (C.E, 1999), el Manual de Operaciones de Rellenos Sanitarios EPA (USEPA, 1994) y la norma ambiental colombiana (República de Colombia, 2000) son una muestra de buenas políticas ambientales para la disposición final de residuos sólidos.

En la primera parte de este artículo se hará una comparación cualitativa de la norma mexicana con los lineamientos internacionales. Posteriormente, se presentarán y comentarán los elementos de diseño que no son considerados en la construcción, operación y

clausura de rellenos sanitarios en México. Finalmente, se mostrarán algunos aspectos que se deben considerar en rellenos sanitarios construidos sobre suelos blandos, de acuerdo a análisis realizados para la IV etapa del relleno sanitario Bordo Poniente de la ciudad de México. Este es el único relleno sanitario documentado que está construido sobre suelos blandos de origen lacustre. Este artículo señala algunos lineamientos para el diseño de rellenos sanitarios sobre suelos blandos y algunos otros para mejorar su construcción y operación. Este artículo no es una guía de diseño y construcción de rellenos sanitarios, solo tiene por objeto contribuir a crear conciencia sobre buenas prácticas en la disposición de residuos sólidos municipales.

2 COMENTARIOS A LA NORMA

De acuerdo a la NOM-083 y otras normas citadas, hay un proceso lógico de concepción de un relleno sanitario dentro de un plan de gestión de residuos. La iniciativa de construir un relleno sanitario está antecedida por un diagnóstico del servicio actual. Luego, se debe hacer un estudio de factibilidad de proyecto que involucre la selección e investigación de los posibles sitios para construirlo, que cumplan con la norma; luego la aprobación de la entidad competente. Una vez se tiene el sitio, se hacen estudios detallados, se elabora un proyecto ejecutivo del diseño, se evalúan los impactos ambientales y se busca la aprobación del proyecto.

Luego se puede negociar la adquisición de los terrenos y construir el vertedero.

Los estudios de selección de sitios representan un aspecto importante para la concepción de un relleno sanitario. Estos involucran restricciones, que por superposición, ayudan a encontrar un terreno en donde la operación del relleno sanitario representa un mínimo impacto ambiental.

En el caso de restricciones relacionadas con los aspectos geológico y de nivel freático, la NOM-083 es bastante abierta. Se prohíbe la construcción de rellenos sanitarios sobre fracturas, fallas geológicas y cavernas. Las demás norma son más específicas frente al tema y definen, por ejemplo, distancias de aislamiento mínimas a fallas geológicas (500 m), niveles freáticos a una profundidad mayor a 1.0 m, permeabilidad del suelo menor a $1e-08$ m/s, profundidades a la roca dura mayores a 3.0 m y pendientes moderadas del terreno (1V:8H); aún más, se prohíbe el desplante de vertederos en suelos especiales (altamente compresibles, suelos expansivos y suelos kársticos). Normas como la de la EPA exigen también la realización de estudios de respuesta de sitio y vulnerabilidad sísmica, además de análisis de estabilidad estática y pseudoestática.

Con respecto a la cercanía a los cuerpos de agua, nuevamente la NOM-083 tiene criterios propios. Considera que la distancia mínima puede ser de 500m a cuerpos de aguas superficiales, zonas de drenaje natural, pozos de extracción, por ejemplo. Además advierte que no se deben colocar dentro de zonas de inundación con periodos de retorno de 100 años. La norma colombiana es un poco más rigurosa y exige distancias de aislamiento de hasta 1 km. Para la EPA la restricción de zona de inundación es suficiente pero es la única que exige un estudio detallado que descarte la contaminación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

Uno de los temas más criticados en México, es la cercanía de las poblaciones a los sitios de disposición final de residuos urbanos. SEMARNAT recomienda que una distancia mínima de 500m a asentamientos humanos mayores a 2500 habitantes. Otras normas sugieren más de 1 km.

Con respecto a otras restricciones, SEMARNAT prohíbe la construcción de rellenos en zonas protegidas o arqueológicas y es muy riguroso con el aislamiento a aeropuertos, para lo cual exige un estudio de riesgo aviario en caso de no cumplir la distancia de restricción de 13,000 m. Las otras normas incluidas en esta revisión

recomiendan una distancia a aeropuertos de 3,000 m e incluyen otros criterios de exclusión: para vías cercanas, distancias de aislamiento de hasta 600 m y una distancia máxima de acceso al relleno entre 10,000 y 30,000 m para que la operación del relleno sanitario sea viable económicamente.

De acuerdo a lo anterior, desde el punto de vista de la selección de sitios para rellenos sanitarios, la normatividad mexicana no es tan estricta como se desea y no cubre aquellos rellenos que fueron aprobados antes de 2003. Este el caso de Bordo Poniente, el cual es el relleno de mayor capacidad en todo el territorio mexicano.

Otro aspecto que trata la norma mexicana es la realización de estudios básicos. Para ello clasifica los rellenos sanitarios en cuatro grupos como se muestra en la Tabla 1. El límite superior de capacidad de un relleno sanitario es de 100 t/día (1000 kN/día), lo cual dista de la capacidad de un vertedero como la IV etapa de Bordo Poniente en donde se disponen en promedio 125000 kN/día de RSM. Otro aspecto que causa preocupación es que para rellenos con capacidad menor a 100 kN/día no se recomienda ningún tipo de estudio. Esto se debe a que SEMARNAT define los aspectos generales de construcción para los rellenos tipo D.

Se hizo una revisión de los datos del INEGI del pasado conteo de población de 2005. Con estos datos se observa que es posible tener una clasificación de rellenos sanitarios más estricta como la que se muestra en la Tabla 2, en donde se considera el número de habitantes y una producción per cápita de residuos de 15 N/día (Tchobanoglous *et al*, 1993).

En la etapa de construcción la NOM-083, una vez realizada la limpieza, desmonte y conformación de los caminos de circulación y acceso, se recomienda la impermeabilización del piso de desplante. Para esto, se puede emplear material de préstamo de 1.0 m de espesor mínimo, lo cual asegure una permeabilidad de $1E-09$ m/s. En algunos casos los sistemas de aislamiento se hacen con arena arcillosa, la cual no puede asegurar esa permeabilidad. En este caso lo adecuado es utilizar arcilla compactada del lado húmedo (Qian *et al*, 2002). Aún más, en el caso de no contar con material de préstamo, se puede recurrir al uso de geomembranas. En México las geomembranas que se utilizan como capa aislante en vertederos es lisa de 1.0 mm de espesor, mientras que lo adecuado es utilizar geomembranas texturizadas de al menos 1.5 mm de espesor (USEPA, 1993).

Tabla 1. Estudios recomendados para rellenos sanitarios de acuerdo a la cantidad de residuos dispuestos diariamente (NOM-083-SEMARNAT-2003).

Tipo	Residuos kN/día	Geológico e hidrogeológico regional	Geológico, hidrológico geohidrológico detallados	Tipos de estudio			
				Topográfico y geotécnico	Generación y composición de residuos	Generación de gas y lixiviado	
A	> 1000	Si	Si	Si	Si	Si	
B	500 a 1000	N.A.	Si	Si	Si	Si	
C	100 a 500	N.A.	N.A.	Si	Si	N.A.	
D	<100	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	

N.A. No aplicable

Tabla 2. Clasificación de rellenos sanitarios para México, teniendo en cuenta el tamaño de las poblaciones.

Tipo	Residuos a disponer kN/día	Habitantes	No. de poblaciones en México
A	> 15000	> 1000000	11
B	1500 a 15000	<1000000	112
C	150 a 1500	<100000	688
D	<150	<10000	187127

El uso de geomembranas es de particular cuidado. El no asegurar una superficie de protección entre el suelo de desplante y la geomembrana, o entre ésta y los residuos o los sistemas de recolección de lixiviados, puede afectar su capacidad impermeable. Lo recomendable sería utilizar estos materiales en un arreglo compuesto en donde se combine la geomembrana con una capa de arcilla compactada en la parte inferior y un geotextil no tejido como protección en la cara superior (Qian *et al*, 2002). Obviamente esto incrementa los costos que los administradores de rellenos frecuentemente no pueden cubrir.

Sobre el sistema de aislamiento se construye el sistema de recolección de lixiviados. Se puede hacer por medio de canales que aseguren el drenaje de los mismos o por tuberías perforadas. Estos se deben recoger en un punto y conducirlos hasta cárcamos de bombeo para su recirculación o tratamiento. Se debe tener en cuenta que no siempre la recirculación de lixiviados es favorable para la estabilidad geotécnica de los rellenos sanitarios.

Sobre la disposición de los residuos propiamente, la NOM-083 no señala los equipos que se deben emplear. De acuerdo al tipo de relleno exige densidades de compactación (Tabla 3). Para los rellenos de mayor capacidad exige una densidad entre 1.0 y 7.5 kN/m³ y en los demás permite que no se compacten, lo cual es preocupante. La densidad de compactación está relacionada no solo con la vida útil del relleno, sino también con su estabilidad geotécnica y los asentamientos futuros. La literatura internacional y reportes en México, hablan de densidades de compactación típicas entre 8.5 y 9.5 kN/m³ que es lo mínimo que se debe exigir para cualquier tipo de relleno sanitario.

Otro tema que no considera la norma mexicana es la exigencia de controles geotécnicos durante todas las etapas del relleno sanitario. Quizás por esta razón la casi totalidad de los rellenos sanitarios que operan actualmente, a excepción de la IV etapa de Bordo Poniente, carecen de instrumentación geotécnica. Una instrumentación básica en un relleno sanitario consiste

Tabla 3. Requerimientos de compactación.

Tipo	Residuos a disponer kN/día	Densidad de compactación kN/m ³
A	> 1000	1.0 a 7.5
B	500 a 1000	0.5 a 1.0
C	100 a 500	0.1 a 0.5
D	<100	-

en piezómetros para monitorear las presiones al interior del relleno sanitario, inclinómetros para el control de la estabilidad de taludes y bancos de nivel tanto en el terreno natural como en la celda de residuos para medir los asentamientos de los residuos.

Finalmente está el control de gases. Lo ideal es aprovecharlos aunque por la mala calidad de nuestros residuos domésticos (alta humedad y poca separación) el biogás que se produce es de baja calidad. En México la recolección de gases se hace con sistemas de columnas de grava o tubos a cielo abierto donde a nivel de la cobertura final, en algunos casos, se instalan los quemadores para consumir el biogás. La NOM-083 dice que a edades tempranas no es necesaria la instalación del sistema de recolección de gases. La realidad es que la máxima generación de gases en un relleno sanitario ocurre a los pocos años de operación y esto podría causar eventuales problemas de estabilidad por el mal manejo de los mismos, como se explicará en el capítulo siguiente.

Otro aspecto importante lo constituyen los controles durante operación. SEMARNAT exige monitoreo de calidad de gases, lixiviados y acuíferos, pero no es clara en los parámetros a controlar. Además olvida el tema de la estabilidad geotécnica del relleno, lo cual es crítico puesto que muchas fallas de estas estructuras se deben a descuidos en su manejo como lo han documentado diversos autores: Johannessen y Boyer, 1997; SADAT International INC, 1997; Collazos, 1998; Chang *et al*, 1999; Dickinson *et al*, 2002; Espinace, 2003 y Koelsch, 1999, 2005a, 2005b.

3 MANEJO DE RELLENOS SANITARIOS

Parte de las deficiencias que se pueden observar en rellenos sanitarios se deben principalmente a la falta de contundencia de la normatividad.

En el relleno de Naucalpan, por ejemplo, se observan algunos detalles. En la Figura 1a se presenta una fotografía tomada en 2007 cuando se estaba adecuando la celda de disposición de residuos sólidos. El suelo de la zona es arenoso y tiene una permeabilidad alta. Como sistema de aislamiento se colocó una geomembrana lisa de 1.0 mm de espesor, la cual se ancló a la corona del talud con un sistema como el mostrado en la Figura 1b. Para proteger la geomembrana en el fondo de la celda se usó arena arcillosa compactada y en los taludes se colocaron pañales desechables nuevos (rechazo de producción). La falta de control geotécnico en la construcción de rellenos sanitarios en México se hace evidente. Se obliga una interface débil entre dos materiales lisos, cuyo ángulo de fricción es despreciable. La pendiente de la celda es importante, lo cual favorecería el deslizamiento de los residuos. En otros rellenos sanitarios, se colocan neumático como protección de la geomembrana, que tampoco aseguran un ángulo de fricción adecuado.

La realidad es que la mayoría de sitios de disposición son tiraderos a cielo abierto que no obedecen a ningún diseño. Los controles son mínimos y concentrados en la parte operativa de la administración del relleno.

Un relleno sanitario debe ser una instalación de ingeniería diseñada para la disposición final de residuos

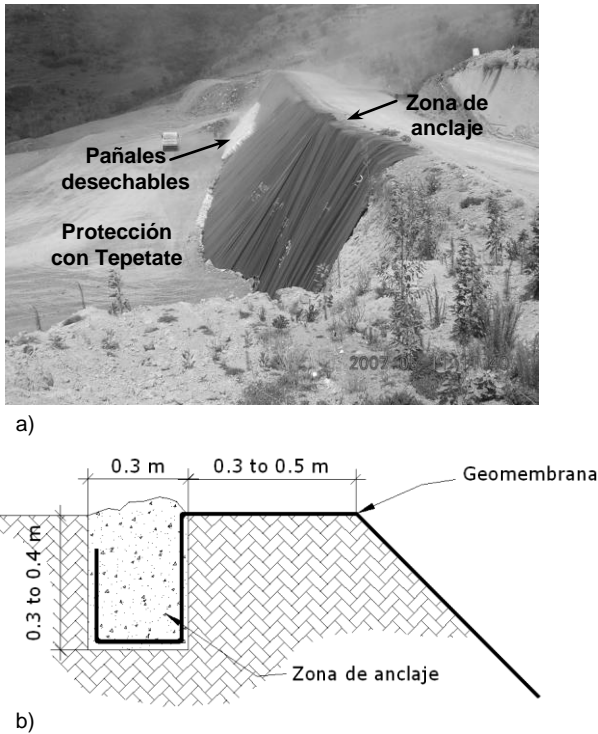


Figura 1. a) Instalación de geomembrana en el relleno de Naucalpan, b) anclaje típico para geomembranas.

sólidos municipales, R.S.M. Los R.S.M están confinados con sistemas de aislamiento tanto en el fondo como en la superficie, con el propósito de evitar las filtraciones de agua al interior del relleno y la contaminación de las aguas subterráneas a causa de los lixiviados. Además debe contar con sistemas de recolección de gases y de lixiviados.

Su conformación se diseña de acuerdo a su capacidad y el área disponible. Se pueden construir parcialmente excavados (tipo zanja o trinchera) cuando las condiciones del N.A.F así lo permiten. Otra conformación se logra utilizando únicamente el área superficial (tipo área o zona) cuando el N.A.F está a un 1.0 m de profundidad y hay disponibilidad suficiente de terreno. Para la conformación tipo ladera se requieren de pendientes 1V:8H.

El manejo de rellenos sanitarios debe contemplar algunos lineamientos básicos desde el punto de vista geotécnico como se explica a continuación:

3.1 Preparación del sitio

Además de la limpieza de la zona y la construcción de vías de acceso y circulación, la ejecución de obras de drenaje superficial es necesaria en el área del relleno sanitario. El estudio hidrológico debe incluir recomendaciones para evitar escurrimientos directamente sobre la celda de disposición.

La adecuación de la celda sería el siguiente paso. Si el área del relleno es muy grande se prepara sección por sección, conforme se utilizan durante la operación. Esto con el fin de evitar sitios expuestos a la precipitación.

Posteriormente se conforma el sistema de aislamiento (Tchobanoglous *et al*, 1993).

Las pendientes de los taludes se diseñan de acuerdo a estudios de estabilidad tanto de la celda sin residuos como del relleno en su etapa final. En esta etapa se requieren de estudios de respuesta de sitio y análisis de estabilidad pseudoestáticos que garanticen la estabilidad a corto y largo plazo del vertedero y sus instalaciones (Qian *et al*, 2002).

3.2 Sistemas de aislamiento

Los sistemas de aislamiento, de acuerdo a la literatura disponible, pueden ser tan complejos como se quieran, pero es preferible recurrir a soluciones sencillas y efectivas. El mejor sistema de aislamiento es arcilla compactada del lado húmedo. Se puede obtener experimentalmente una zona aceptable donde el contenido de agua y el peso unitario seco estén asociados con la más baja permeabilidad posible para el tipo de suelo ($\leq 1.0E-09$ m/s). Este rango de humedad aceptable varía con las características del suelo (Qian *et al*, 2002). Estudios realizados en el Instituto de ingeniería de la UNAM (Lara *et al*, 1986) mostraron que la compactación por amasado arroja menores valores de permeabilidad que el método de Proctor Modificado.

Al momento de diseñar un sistema de aislamiento, se deben considerar otros aspectos como el esfuerzo cortante y el potencial de contracción. La resistencia al cortante se determina conformando muestras de acuerdo a los resultados de permeabilidad obtenidos, que luego se ensayan mediante pruebas UU; de esta manera se obtiene un diseño de arcilla compactada con el mejor comportamiento mecánico. Las arcillas compactadas en el lado húmedo pueden presentar problemas de desecación en zonas áridas o en estaciones secas debido a su potencial de contracción. Se puede esperar la aparición de fisuras y grietas que incrementan la permeabilidad de la capa. Para controlar este aspecto, se debe evitar el uso de arcillas de alta plasticidad, es decir con índices de plasticidad mayores a 50% (Qian *et al*, 2002). El curado previo y la compactación en capas menores a 0.15 m con tractores agrícolas pesados, son prácticas que garantizan el buen comportamiento de sistemas de aislamiento con arcilla de alta compresibilidad (Lara *et al*, 1986). También es importante rociar agua periódicamente para evitar que se seque la superficie de la capa y cubrir las áreas ya terminadas hasta la colocación de los residuos. El refuerzo de la capa con geomallas podría mitigar los errores durante la construcción.

En caso de no contar con materiales de préstamo adecuados, se justifica recurrir al uso de geomembranas. Los materiales poliméricos más usados en las geomembranas son: el polietileno de alta densidad HDPE, el polietileno de baja densidad LDPE, el cloruro de polivinilo PVC, y el polietileno clorosulfonado CSPE, pero las que tienen un mejor comportamiento para la retención de gases, son las de polietileno de alta densidad HDPE y las de polietileno clorosulfonado CSPE (Qian *et al*, 2002).

Teniendo en cuenta que las geomembranas que más se utilizan en México son las HDPE, se comentarán algunas de sus propiedades:

Con respecto a su relación de Poisson, el HDPE puede considerarse como de volumen constante (Wesseloo *et al*, 2004). Tiene una relación de Poisson natural de 0.5, pero que disminuye al aplicar esfuerzos de trabajo.

En las geomembranas HDPE el comportamiento esfuerzo-deformación se estudia mediante ensayos de tensión (ASTM D638-94, ASTM D4885-88 y ASTM D5617-94). A la tensión, las geomembranas lisas de HDPE se comportan muy bien a esfuerzos hasta de 1500 kPa logrando una deformación antes de la falla entre 700 y 1000% (Qian *et al*, 2002). Las texturizadas solo alcanzan deformaciones del 100% con mayor resistencia. A muy bajas velocidades de deformación (< 0.1%/min) y altas velocidades de deformación (> 20%/min) la dependencia entre el esfuerzo y la velocidad de deformación no es lineal (Wesseloo, 2004).

La geomembrana tiene una gran influencia en las interfaces. Las de acabado texturizado tienen un mejor comportamiento cuando se combinan con otros materiales, ya que proporcionan mayor ángulo de fricción en el contacto (USEPA, 1991). Las geomembranas lisas tienen menores ángulos de fricción en el contacto que las texturizadas (Martin *et al*, 1984; Dove *et al*, 1999; Fleming *et al*, 2006) aspecto que es desfavorable para el comportamiento de rellenos sanitarios construidos en ladera.

Otro aspecto importante en los sistemas de aislamiento con geomembrana es el diseño del anclaje. Este se realiza teniendo en cuenta los esfuerzos de tensión producidos por las fuerzas de fricción movilizadas por deslizamiento. También se consideran los esfuerzos de tensión debidos al fenómeno de subsidencia.

La subsidencia es un aspecto a considerar para el diseño la cobertura final del relleno sanitario, en donde los asentamientos por la degradación de la materia orgánica son importantes. Las fuerzas de tensión que se generan dependen del área afectada por el fenómeno, que normalmente es local (Koerner and Hwu, 1991). Sin embargo, en el caso de rellenos sobre suelos de alta compresibilidad, como la IV etapa de Bordo Poniente, se presenta subsidencia tanto en la base del relleno como en su cobertura final, con mayor extensión e incluso acompañado de flotación.

3.3 Operación del relleno sanitario

De acuerdo al tipo de relleno hay distintas maneras de disponer los residuos. Lo ideal es hacerlo de acuerdo a un diseño de celda diaria y un frente de trabajo que depende de la cantidad de vehículos y camiones recolectores que estén operando al mismo tiempo. En México lo usual es colocar y compactar los residuos con el método de rampa el cual consiste en seguir la pendiente del talud de la celda (1V:3H). Luego se coloca la cobertura diaria si hay disponibilidad de material de préstamo. Sin embargo durante la colocación de los residuos, si bien se hace una distribución de la basura en el área, se da por hecho que el paso de un tractor de orugas que compacta los residuos, rompe las bolsas

plásticas en el proceso. En el caso de que las bolsas tengan residuos orgánicos y no se rompan, los gases productos de la descomposición no tienen salida, lo cual eventualmente podría generar explosiones internas en el relleno trayendo problemas de inestabilidad o incendios que pueden durar semanas. Casos similares se han reportado en otros basureros como el de Navarro en Colombia (Espinace, 2003).

3.4 Clausura del relleno

La clausura de un relleno sanitario requiere de un control y monitoreo por periodos que van entre 30 y 50 años (Tchobanoglous *et al*, 1993). Los sistemas de recolección y tratamiento de gases y lixiviados deben seguir operando hasta que los residuos se estabilicen. Además la cobertura final de relleno sanitario se impermeabiliza para garantizar condiciones óptimas de confinamiento.

En la cobertura final del relleno, se emplean también geomembranas. En su diseño se consideran tanto la subsidencia como las fuerzas de tensión. La capa de aislamiento final consta de varias capas con distintas permeabilidades en la que se resaltan una capa de ventilación de gases en la parte inferior y un arreglo conformado por suelo de baja permeabilidad y una geomembrana que asegura la impermeabilidad de la cobertura final. Sobre esto se coloca la capa vegetal (USEPA, 1993).

4 RELLENOS SANITARIOS SOBRE SUELOS BLANDOS

Un aspecto que no se contempla en la normatividad vigente es la construcción de rellenos sanitarios sobre suelos blandos. La cuarta etapa del relleno sanitario Bordo Poniente es el único caso documentado de un relleno sanitario sobre suelos blandos, en el mundo. Por tal motivo, se discuten los aspectos que se deben considerar en rellenos sanitarios de este tipo, cuyo comportamiento y control varían en las distintas etapas de operación.

La cuarta etapa del relleno sanitario Bordo Poniente se ubica en la zona federal del lago de Texcoco al nor-este del Aeropuerto Internacional Benito Juárez de la ciudad de México, en un sitio que contiene suelos lacustres muy blandos y de alta compresibilidad, sometidos al efecto del hundimiento regional generado por el bombeo de agua del acuífero subyacente (Ovando-Shelley *et al*, 2007). Además, lo delimitan obras de infraestructura hidráulica importantes para la ciudad, como los brazos izquierdo y derecho del río Churubusco y el Canal de la Compañía.

El relleno está provisto de un aislamiento de fondo constituido por una geomembrana lisa HDPE de 1.0 mm de espesor, la cual influye notoriamente en el comportamiento del suelo de desplante.

Hace algunos años, se decidió evaluar la posibilidad de extender el tiempo de operación de la cuarta etapa de Bordo Poniente aumentando la altura de 8.0 m (SOS *et al*, 2004). Con ese objeto se realizó entre junio y diciembre de 2003, una prueba de carga de grandes dimensiones. La prueba se hizo directamente sobre un

relleno sanitario preexistente donde también existe la barrera impermeable de geomembrana. La descripción y el análisis de los resultados de esta prueba sirvieron de base para la calibración de un modelo de elementos finitos, que permite estudiar la estabilidad general del relleno sanitario. A partir de estos resultados se detectaron algunos aspectos que son propios de rellenos de este tipo y que valen la pena resaltar.

4.1 Descripción de la prueba de carga

La prueba de carga realizada en Bordo Poniente entre julio y diciembre de 2003, se llevó a cabo en un terraplén compactado de arcilla arenosa, que abarca un área de 150 x 150 m y una altura de 4.85 m. Los materiales compactados se colocaron en nueve etapas sobre un relleno existente de RSM de aproximadamente 6.0 m de altura media (Contreras *et al*, 2000), como se observa en la Figura 2. El relleno aporta una presión de contacto de aproximadamente 60 kPa al suelo subyacente, mientras que el terraplén de carga aplica 89.5 kPa, lo que equivale a 10.5 m de RSM, con un peso volumétrico de 8.5 kN/m³. La prueba de carga se instrumentó con cinco piezómetros de cuerda vibrante, dos piezómetros abiertos y tres inclinómetros; también se utilizaron bancos de nivel superficiales y profundos (Contreras *et al*, 2001).

4.2 Resultados de los análisis

Al final de la prueba de carga efectuada entre junio y diciembre de 2003 no ocurrió la falla del terraplén, como se predijo en los análisis de equilibrio límite realizados con antelación, aunque sí se presentaron algunas fisuras en la cobertura de los residuos; también fue notorio el retardo en la disipación del exceso de presión de poro producido durante la prueba (Cabrera-Velázquez, 2009). Como se observa en la Figura 3, las presiones de poro medidas en la estación piezométrica más cercana a la prueba de carga (ver Figura 2), registraron en todas las etapas, incrementos de presiones en el suelo lacustre que tiene una profundidad de 40 m. La presión de poro se disipa lentamente como indica la medición de octubre de 2009, 77 meses después.

En modelos con métodos numéricos, bidimensional y tridimensional, que se realizaron para replicar el

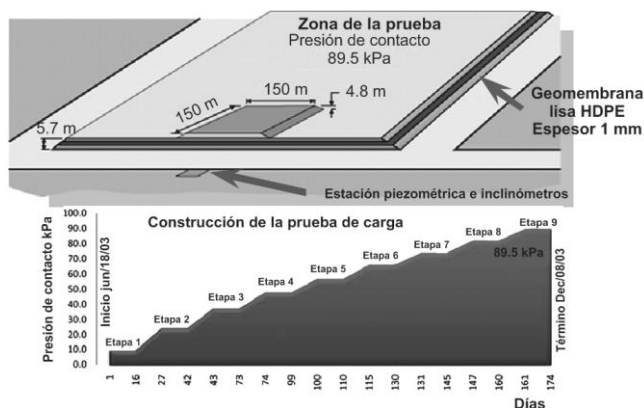


Figura 2. Descripción de la prueba de carga.

comportamiento de la prueba de carga (Cabrera-Velázquez, 2009 y Parra *et al*, 2010a y 2010b) se comprobó que bajo carga instantánea la falla del suelo de desplante era inevitable. En los modelos se emuló el proceso constructivo de la prueba por etapas y el proceso de consolidación posterior. La consolidación posterior a cada etapa permite que el suelo se recupere parcialmente, logrando por el cambio de volumen desarrollar un poco más de resistencia.

También se comprobó que la presencia de la geomembrana retarda la disipación del exceso de presión de poro durante el ensaye. En efecto, la consolidación ocurre a una velocidad mucho más lenta, como se determinó a priori, lo que resulta favorable para el seguimiento de la estabilidad del relleno sanitario durante operación.

Sin embargo, los excesos de presión de poro no disipados o disipados lentamente implican una reducción de los factores de seguridad en los taludes del relleno durante el proceso de carga, hasta alcanzar valores precarios en el corto plazo. Posteriormente, los factores de seguridad se incrementan conforme aumentan los esfuerzos efectivos al transcurrir el proceso de consolidación (Cabrera-Velázquez, 2009). En efecto, en el corto plazo el factor de seguridad es ligeramente superior a 1.00 y en el largo plazo alcanza valores cercanos a 2.0.

De acuerdo a estos resultados se puede concluir que la velocidad de aplicación de la carga influye en gran medida en la estabilidad de rellenos sanitarios de este tipo durante su operación. Sin embargo, calcular el tamaño de la celda diaria tendría que hacerse utilizando pruebas de carga a escala de campo como la efectuada en este estudio, lo cual implica costos importantes para un proyecto de esta magnitud. El uso del método observacional resulta ser más ventajoso en la medida en que se pueden controlar la evolución de las presiones de poro durante la disposición de los residuos mediante la instrumentación de la zona del vertedero. Otros aspectos que se observaron en la prueba de carga fueron la

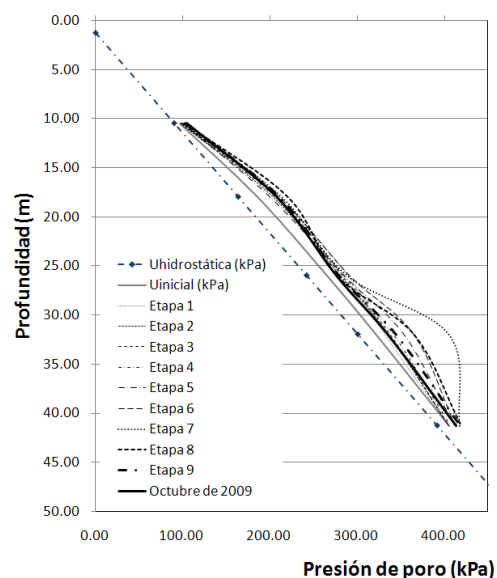


Figura 3. Presiones de poro medidas cerca de la prueba

generación de asentamientos y desplazamientos horizontales importantes en el corto plazo. En la Figura 4, se observa el comportamiento del inclinómetro 1 (frente a la prueba de carga). Los desplazamientos horizontales alcanzan el medio metro en la etapa 8.

Los asentamientos que se calcularon en el modelo tridimensional, también son importantes. En la Figura 5, se observa el perfil de deformaciones. El asentamiento máximo es de 1.8 m en el borde del área cargada. Los asentamientos se asocian a deformaciones calculadas con respecto a una condición de referencia antes de la prueba de carga. Su magnitud se atribuye a la compresibilidad de la arcilla, la cual es extremadamente alta.

Las deformaciones totales estimadas para el suelo de desplante producen una elongación de la geomembrana cercana al 30%; este valor se encuentra muy lejos del límite de alargamiento a la falla de la geomembrana (700 %) y el esfuerzo de tensión que se genera está por debajo del admisible (17.87 kPa contra 27.0 kPa a la falla).

Es aquí donde la selección de un aislamiento impermeable adecuado es relevante. Para el diseño de una impermeabilización con geomembrana se debe considerar la elongación a la fluencia y a la rotura. Una geomembrana texturizadas tienen elongaciones a la falla de hasta el 100%, mientras las lisas hasta del 700%. Una mayor elongación significa tener una superficie potencial de falla con ángulo de fricción despreciable. Además, el diseño de el anclaje (Figura 1b), el cual consiste en determinar una longitud que compense la fuerza de tensión a la que está sometida la geomembrana (Qian *et al*, 2002), podría ser insuficiente para la vida útil del relleno. En este caso se recomienda realizar la impermeabilización con una capa de arcilla y usar

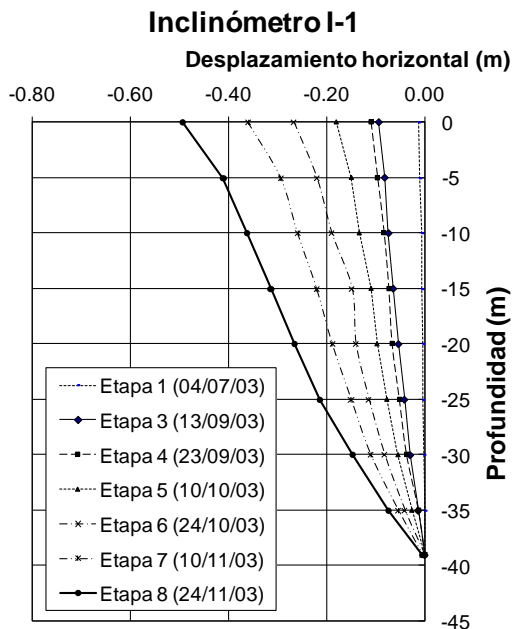


Figura 4. Desplazamientos horizontales medidos durante la prueba de carga.

materiales granulares de separación que mejoren la resistencia de la interface en la base del relleno. Esta solución estaría condicionada a la profundidad del NAF, ya que la endentación de los residuos y el efecto de flotación podrían propiciar la contaminación directa de los acuíferos con los lixiviados que se producen durante la descomposición de la materia orgánica.

5 CONCLUSIONES

La falta de contundencia de la normatividad ambiental vigente para la disposición de residuos, no es una excusa para la implementación de buenas prácticas de ingeniería.

Con este artículo, los autores buscan crear conciencia sobre el problema en el manejo geotécnico de rellenos sanitarios en México y aportar algunos lineamientos básicos.

En rellenos sanitarios sobre suelos blandos la velocidad de aplicación de la carga influye en la estabilidad durante operación. La generación de presiones de poro en el corto plazo puede llevar el relleno a la falla.

Debido a las grandes deformaciones, se recomienda evitar el uso de geomembranas como capa de aislamiento en rellenos sanitarios sobre suelos blandos.

6 AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM; al Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería de la Facultad de Ingeniería, UNAM; a la Dirección General de Servicios Urbanos, DGSU, de la Secretaría de Obras Públicas del Gobierno del Distrito Federal; a TGC Geotecnia, S.A de C.V. y a la Sociedad Internacional de Geosintéticos, IGS Capítulo México.

7 REFERENCIAS

- Cabrera-Velázquez, M. C. 2009. *Análisis del terraplén de prueba y de los taludes del Bordo Poniente IV etapa*. Tesis para optar al grado de Maestro en Ingeniería. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Chang M. H., Mitchell J. K. y Seed R. B. 1999. Model Studies of the 1988 Kettleman Hills Landfill Slope Failure. *Geotechnical Testing Journal*. Volumen 22, tema 1, marzo.
- Collazos.H. 1998. Deslizamiento de Basura en el Relleno Sanitario de Doña Juana, www.ceamse.gov.ar/bibliotextos.html, enero.
- Contreras, R., Trigo-Lara, M. y Santoyo-Villa, E. 2000. *Análisis de sobre-elevación de celdas en Bordo Poniente IV etapa*. Informe geotécnico realizado por TGC Geotecnia, para la División General de Servicios Urbanos (DGSU), México, D.F.
- Contreras, R., Trigo-Lara, M. y Santoyo-Villa, E. 2001. *Instrumentación para la sobre-elevación del relleno sanitario Bordo Poniente IV etapa*. Informe geotécnico

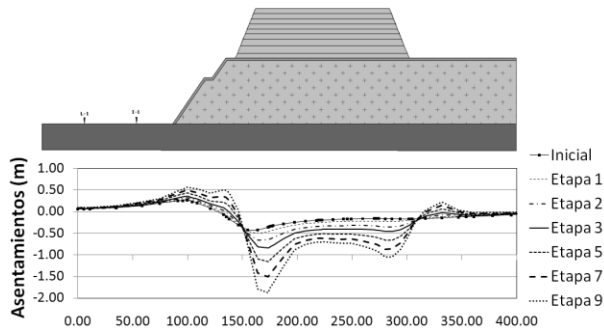


Figura 5. Perfil estratigráfico típico del relleno sanitario Bordo Poniente.

realizado por TGC Geotecnia, para la División General de Servicios Urbanos (DGSU), México, D.F.

Dickinson C. E., Boyd P. y Gillies I. 2002. Gayton landfill scrutiny report, \Orihects\C33243 \Documents \Reports\Gayton Security Report Final (1c), Appendix A.

Dove J. E. y Frost J. D. 1999. Peak friction behavior of smooth geomembrane-particle interfaces. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*. Vol. 125, No. 7, Julio: 544 – 555.

Espinace A. R. 2003. Geotecnia ambiental en rellenos sanitarios. http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/03_clases_catedra/clases_catedra_ms2/ms2/geotecnia_ambiental_2.pdf. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.

European Parliament, E.P. 1999. *Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste*. Belgian.

Fleming I. R., Sharma J. S. y Jogi, M. B. 2006. Shear strength of geomembrane-soil interface under unsaturated conditions. *Geotextiles and Geomembranes*. 24 (2006): 274-284.

Johannessen L. y Boyer G. 1997. Observations of solid waste landfills in developing countries: Africa, Asia y Latin America. web.mit.edu/urbanupgrading/urbanenvironment/resources/references/key-sectors.html, The world Bank.

Koelsch F. 1999. Rumpke Landslide. <http://www.dr-koelsch.de/html/rumpke.gb.html>, Geo – und Umwelttechnik – Dr. Këlsche.

Koelsch F., Fricke K., Mahler C. y Damanhuri E. 2005a. Stability of Landfill – The Bandung Dumpsite Disaster. http://www.dr-koelsch.de/html/bandung_gb.html, Alemania.

Koelsch F. 2005b. Payatas Landslide. <http://www.dr-koelsch.de/html/Payatas.gb.html>, Geo – und Umwelttechnik – Dr. Këlsche.

Koerner R. M. y Hwu B. L. 1991. Stability and tension considerations regarding cover soils on Geomembrane lined slopes. *Geotextiles and Geomembranes*. ELSEVIER Science Publishers Ltd. England: 335-355.

Lara J., Almanza R., Auvinet G. e Hiriart G. 1986. *Estanque de enfriamiento de Río Escondido*. Publicación del Instituto de Ingeniería UNAM. No. 501: 60 – 66.

Martin, J. P., Koerner, R. M., Whitty, J. E. 1984. Experimental friction evaluation of slippage between geomembranes, geotextiles and soils. *Proc. of International Conference on Geomembranes*. IFAI. Denver, CO. pp. 191 – 196.

Ovando-Shelley E., Romo, M. P. y Ossa, A. 2007. The sinking of Mexico City: Its effects on soil properties and seismic response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 27, No. 4: 333-343.

Parra-Piedrahita N. P., Ovando-Shelley E. y Cabrera-Velázquez M. C. 2009a. Comportamiento de una geomembrana en un relleno sanitario sobre arcillas blandas. *Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica*, A.C. No. 215: 12–16.

Parra-Piedrahita N. P., Ovando-Shelley E., Cabrera-Velázquez M. C. Trigo-Lara M. y Contreras R. 2010b. Field test to assess the influence of a geomembrane liner in a landfill on soft clays. *Proc. 9th International Conference on Geosynthetics*. ed. E. M. Palmeira et al. V2: 1025-1028.

Qian X., Koerner R. M. y Gray D. H. 2002. *Geotechnical aspects of landfill design and construction*. Prentice Hall. Estados Unidos. 8 – 13, 52 – 179.

República de Colombia, Ministerio de Desarrollo Económico, Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. 2000. *Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000 – Título F*. Resolución No. 1096 de 17 de Noviembre de 2000.

Sadat International, INC, Universidad de los Andes y Arthur D. Little, INC. 1997. *Informe del diagnóstico geotécnico y ambiental de las causas del deslizamiento en el relleno sanitario de doña Juana*. Bogotá, Diciembre.

Secretaría de Obras y Servicios SOS – Dirección General de Servicios Urbanos DGSU. 2004. *Manejo de residuos en el Distrito Federal*. Reporte oficial para el Gobierno del Distrito Federal, México, D.F.

SEMARNAT. 2003. *Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, “Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial”*.

Tchobanoglous G., Theisen H. y Vigil S. 1993. *Integrated solid waste management: Engineering Principles and Management Issues*. Irwin McGraw-Hill. Estados Unidos: 138.

United States Environmental Protection Agency, USEPA. 1994. *40 CFR Part 258. Solid Waste Disposal Facility Criteria*. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency USEPA. 1991. *Design and Construction of RCRA/CERCLA Final Covers*. EPA/625/491/025, Office of Research and Development, U.S.

Wesseloo J., Visser A. T. y Rust E. 2004. A mathematical model for the strain-rate depend stress-strain response of HDPE geomembranes. *Geotextiles and Geomembranes*. No.22: 273-295.