

**AULA DE MEDIO AMBIENTE DE SUANCES
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**

**Curso XX: VERTEDEROS CONTROLADOS DE RESIDUOS SÓLIDOS
URBANOS: UNA PERSPECTIVA INTERNACIONAL
Suances, España, 4 al 8 de Septiembre de 2000**

Autor: Dr. Raúl Espinace Abarzúa

LA GEOTECNIA AMBIENTAL APLICADA A LOS VERTEDEROS SANITARIOS

INTRODUCCION

En muchos países iberoamericanos, la producción de residuos sólidos urbanos (RSU) pasó del orden de 0,60 kg./hab/día en 1985 a cerca de 0,90 kg./hab/día en 1999. El vertedero sanitario, medio mas ampliamente empleado como disposición final de estos residuos, es una obra de ingeniería en la que se emplean técnicas y maquinaria de movimiento de tierras para construir rellenos artificiales. Los residuos sólidos empleados como material principal del relleno, tienen un elevado potencial contaminante que se refleja principalmente en la producción de lixiviados y biogas. Las características y heterogeneidad de estos residuos, influyen en debilidades geotécnicas como alta compresibilidad, baja capacidad portante y débil estabilidad. Por ello, en la actualidad existe una creciente participación de profesionales geotécnicos en las etapas de selección del emplazamiento, diseño, construcción, cierre, sellado y reinserción de rellenos sanitarios.

A modo de ejemplo, en Santiago de Chile los costos de inversión y operación, van desde 5 a 9 dólares por tonelada dispuesta para los residuos recolectados por los municipios y de 17 hasta sobre 40 dólares en el caso de las tarifas canceladas por particulares. Estas cifras son representativas de muchas ciudades latinoamericanas, mientras que en los países desarrollados los máximos pueden alcanzar hasta 3 kg/hab/día. Los costos en estos países desarrollados van desde 12 a 36 dólares por tonelada dispuesta, para residuos municipales. En los próximos años estos costos se incrementarán, debido al aumento en la cantidad y variación de las características de los desechos y debido a las restricciones medioambientales que exige el desarrollo sustentable.

Estos antecedentes permiten deducir que se está en presencia de una obra de ingeniería de importantes costos, donde la geotecnia tiene una activa participación tanto en el proyecto, como en su ejecución, operación y rehabilitación.

Estos trabajos se desarrollan dentro de la línea que se ha denominado "geotecnia o geotecnología ambiental", que es el encuentro entre la geotecnia clásica y las

ciencias ambientales, que se produce cuando se atienden cuestiones en las que por el propio material o por el método de solucionar el problema, es preciso el concurso de la geotecnia, o cuando se trata de aspectos geotécnicos en los cuales las acciones son de tipo ambiental.

Las primeras referencias específicas sobre el tema, se encuentran en la década de los setenta, con la creación de un subcomité de la ASTM, con el título de "Geotechnics of waste management". El primer evento donde se trata mas profundamente del tema es en el IX Congreso Internacional de la ISSMFE (Tokio, 1977), donde se dedicó a este tema una sesión especial. En el Congreso siguiente (Estocolmo,1981), la dedicación crece al incluir como una de las sesiones la de "Environmental Geotechnics". Este interés aumenta en los congresos siguientes.

Actualmente, los principales avances sobre geotécnia de vertederos, son canalizados por el Comité Técnico TC 5 "Geotécnia Ambiental", de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE), el cual fue creado el año 1994. Durante el 3er Congreso Internacional de Geotécnia Ambiental, realizado en 1998 en Lisboa, se presentó el estado del arte desagregado entre otros, en los siguientes temas: Sistemas de Monitoreo; Estabilidad de Residuos; Vertederos Sanitarios Controlados; Comportamiento de Vertederos Sanitarios bajo Condiciones de Carga Extremas (por ej. Terremotos). Toda esta información está publicada en el Volumen 3 de los Proceedings.

Las primeras presentaciones a nivel nacional realizadas por este autor, sobre esta rama de la geotecnia fueron en 1983 en el Vto. Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria y del Ambiente, y a nivel internacional en el 21o. Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria de Río de Janeiro, Brasil, en 1985 y posteriormente en 1989 en el Laboratorio de Geotecnia del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) de España (Espinace, Palma, 1990).

ASPECTOS GEOTÉCNICOS EN VERTEDEROS SANITARIOS CONTROLADOS

Como se ha señalado, la Geotecnia aplicada a rellenos sanitarios tiene una activa participación tanto en las etapas de estudio previo a la selección de un lugar destinado a relleno sanitario, como en las de diseño; de construcción de las obras de partida; de operación; de cierre y rehabilitación de antiguos vertederos

En la etapa de **Selección del emplazamiento** de un vertedero sanitario, el sitio debe ser diseñado y manejado de manera que las sustancias nocivas no contaminen en cantidades inaceptables (de acuerdo con regulaciones apropiadas), además de impedir que se produzca una afección no deseada o inaceptable sobre la salud humana, o el medio ambiente.

Se debe intentar localizar, en una primera aproximación, zonas estables desde un punto de vista geológico, es decir, no sometidas a procesos de inestabilidad de

laderas, de karstificación, inundaciones, subsidencias, etc. El paso siguiente consiste en la ejecución de estudios más concretos, donde se estudian aspectos como la permeabilidad y continuidad de los materiales del subsuelo y otros como el sistema hidrológico existente. Estos estudios se llevan a cabo empleando métodos clásicos de investigación geológica e hidrogeológica ya que su objetivo último es conocer la estructura geológica de la zona, la litología de los materiales, así como los procesos geomorfológicos e hidrogeológicos que los están modificando.

Para evaluar la idoneidad de un sitio se requiere contar, entre otros, con los siguientes antecedentes:

- Reconocimiento de la distribución de las aguas freáticas, vías de flujos y barreras (acuíferos y acuíclulos), sus propiedades hidráulicas y el potencial de mejoramiento del efecto sellante del subsuelo.
- Información acerca de la disponibilidad y calidad de materiales para cobertura, su facilidad para la excavación.
- Reconocimiento de la composición geológica local y general
- Reconocimiento de las características morfológicas y estructura tectónica
- Riesgos de terremotos y otros peligros naturales
- La composición física y química, propiedades y secuencia de los estratos
- La distribución de los estratos, continuidad lateral y vertical.
- El comportamiento esfuerzo deformacional del subsuelo

En cuanto a la estructura y características de los macizos rocosos, los factores siguientes necesitan ser considerados:

- Tipo de roca, composición mineralógica y estratigráfica.
- Estado de descomposición y resistencia a la intemperie.
- Solubilidad en agua, lixiviados u otras soluciones agresivas.
- Extensión, grado de separación y ancho de juntas individuales.
- Tectónica y anisotropías petrográficas en la masa rocosa.
- Karstificación y riesgos de subsidencia.
- Comportamiento deformacional de la masa rocosa.
- Permeabilidad al agua, lixiviado, gases y otras soluciones agresivas.

Una participación activa como hemos visto, le corresponde a la geotécnica en el **conocimiento del régimen de las aguas freáticas**, dado que el agua es el vehículo más activo de difusión de contaminantes en el terreno y por lo tanto es fundamental proteger las aguas limpias para evitar su alteración con otras contaminadas. Por lo tanto, es preciso conocer durante las etapas iniciales del proyecto, adicionalmente a los aspectos ya señalados:

- La dirección del flujo, gradiente y proporción del flujo, incluyendo fluctuaciones estacionales y de largo plazo

- La permeabilidad (horizontal y vertical) o transmisividad del estrato superficial, con máximos y mínimos valores (al agua y lixiviados)
- La distribución, espesores y profundidad de los acuíferos y acuiclusos.
- Características químicas de las aguas freáticas; datos pluviométricos; superficie de escorrentía, niveles de percolación, entre otras.

Adicionalmente a los antecedentes señalados, se requieren otros para el diseño y operación del vertedero, entre los que se destacan:

- Previsiones sobre los materiales a ser empleados como cobertura en el vertedero. Información acerca de la facilidad para su excavación y disponibilidad de préstamos, calidad de este suelo de cobertura disponible y el potencial de mejoramiento del efecto sellante del subsuelo.
- Conocimiento de la capacidad portante y la deformabilidad del suelo de fundación de las obras de partida, la estabilidad de los taludes naturales o artificiales, riesgo deformacional del suelo, riesgo de colapso y fenómenos geológicos activos o reactivables.
- Análisis de la compresibilidad y tiempo de estabilización en las deformaciones de los rellenos, con el propósito de contribuir a la determinación de la vida útil y de futuros usos de los vertederos sanitarios.
- Determinación de la resistencia del relleno, así como la evolución de los parámetros resistentes con el tiempo
- Análisis de la estabilidad de taludes en vertederos, particularmente en lugares de topografía accidentada, donde es necesario recurrir a diseños que cuentan con taludes importantes.

EVOLUCIÓN EN LA APLICACIÓN DE CRITERIOS GEOTÉCNICOS.

La necesidad de proteger el entorno del potencial contaminante de los residuos y particularmente de los lixiviados y gases generados, obliga a confinar el vertedero de manera que no se produzca ningún tipo de migración de gases o lixiviados por el fondo, paredes laterales o por la superficie.

En las situaciones en que no se cuenta con un suelo natural suficientemente impermeable, y no es admisible la contaminación de aguas o suelos que ocasiona el vertedero, se debe disponer una **barrera impermeable** que ejerza esa función. Las barreras deben evitar también la infiltración de aguas de escorrentía superficial y de precipitaciones al relleno.

Entre los materiales comúnmente empleados en la confección de sellos está el suelo arcilloso compactado en capas con coeficientes de permeabilidad inferiores a 10^{-7} m/s y las geomembranas con coeficientes de permeabilidad hasta 10^{-12} m/s a 10^{-14} m/s. La permeabilidad del suelo disminuye con estabilizaciones, que pueden ser de polímeros, cemento, asfalto o arcillas puras como bentonita. También se han

utilizado sellos combinados con hormigón hidráulico y hormigón asfáltico. En los últimos años se han desarrollado diversas geomembranas, las cuales tienen permeabilidades muy bajas, pero debido a sus características deben ser dispuestas en conjunto con suelo compactado y/o mejorado.

El TC 5 de la ISSMGE define entre los antecedentes mas importantes que se debería tratar de obtener de los residuos, para el diseño a: la humedad, densidad, porcentaje de materia orgánica, permeabilidad resistencia al corte, compresibilidad, deformabilidad, capacidad de soporte desde la velocidad de propagación de ondas. Se reconoce la dificultad que tiene obtener estos parámetros a través de ensayos no tradicionales y la interpretación de los resultados.

Otra importante participación de la geotécnia en los vertederos es la que se refiere a la **estimación de la compresibilidad**. Ello porque los residuos sólidos depositados en un vertedero sufren grandes asientos, con lo cual su volumen disminuye y la capacidad del vertedero aumenta. La importancia de cuantificar los asientos que se producen y el tiempo que se extenderán se debe, no solo al aprovechamiento que se puede hacer de la capacidad real del vertedero, sino también de las previsiones a realizar durante la fase de diseño. Así mismo, la evaluación de los asientos tiene gran importancia a la hora de definir la posible utilización del vertedero en su fase de rehabilitación. El ritmo de producción de los asientos en un vertedero es variable con la edad, presentando velocidades que disminuyen con el tiempo, pero que en todo caso se mantienen perceptibles durante años. Se ha podido comprobar que vertederos con alto contenido de residuos orgánicos, los asientos son importantes durante los primeros 10 años.

Los primeros estudios sobre compresibilidad de vertederos datan de la década de 1940 en Estados Unidos, aunque las primeras publicaciones son de los años 70.

La compresibilidad y en general el comportamiento mecánico de un vertedero controlado está afectado por múltiples factores, siendo los principales:

- Composición, características de las basuras y espesor de la celda en el relleno.
- Humedad del residuo, capacidad de campo del relleno.
- Tipo y metodología de rellenos empleada; equipo usado en la operación de compactación y densidades alcanzadas por residuos y material de cobertura.
- Tipo y espesor del material de cobertura, relacionados con la evolución de la T° y humedad, entre otros factores, que influyen en el proceso de descomposición.
- Condiciones climáticas, tanto de pluviometría, como temperaturas ambientales
- Edad del vertedero, condición fundamental en la estabilidad de este.

Una forma típica de abordar la reproducción del proceso de compresibilidad en vertederos, es la utilización de experiencias de comportamientos semejantes en Geotecnia, siendo varios los autores que utilizan teorías semejantes a los estudios de suelos naturales. Ejemplo de ello es el planteamiento propuesto por Sowers (1973), quien establece que los asientos iniciales producidos por mecanismos

mecánicos, se pueden determinar mediante la expresión de la teoría de la consolidación primaria:

$$S_p = \frac{C_c}{1+e_0} H_0 \log\left(\frac{\sigma_{v0} + \Delta\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}}\right) \quad (1)$$

Donde:

S_p = asiento al final de la consolidación primaria
 H_0 = altura inicial del relleno
 C_c = coeficiente de compresibilidad
 σ_{v0} = presión efectiva en el relleno
 $\Delta\sigma_{v0}$ = sobrecarga efectiva
 e_0 = índice de vacíos

Terminada la primera fase aproximadamente al cabo de un mes según Sowers, se inician los asientos producto de cambios físico químicos, degradación biológica y compresión mecánica secundaria. Ellos tienen un comportamiento más o menos lineal con el logaritmo del tiempo, similar a la compresión secundaria de suelos y se determinan mediante la expresión de la teoría de la consolidación secundaria:

$$S_s = \frac{C_\alpha}{1+e_0} H \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (2)$$

Donde:

S_s = asiento durante la consolidación secundaria al tiempo t_2
 H = altura de la celda al tiempo t_1
 C_α = índice de compresión secundaria
 e_0 = índice de vacíos
 t_2 = tiempo de estimación de asientos
 t_1 = tiempo de inicio de la consolidación secundaria

La obtención del coeficiente de compresibilidad (C_c) y del índice de compresión secundaria (C_α) se hace a partir de la relación de estos parámetros con el índice de poros (e_0) en los gráficos propuestos por Sowers (1973) en la figura 1. Estos parámetros han sido contrastados por diversas experiencias, arrojando adecuadas correlaciones. Este criterio ha sido el más empleado hasta ahora en Iberoamérica para predecir los asientos en un relleno sanitario.

Una conclusión interesante es que la compresión primaria es dominante en la producción de asientos en la fase de operación del vertedero y la compresión secundaria es la más evidente una vez que ha concluido la vida útil del relleno.

Un problema práctico importante, es la dificultad para obtener muestras representativas de los materiales para los estudios, y la falta de métodos de ensayos universalmente aceptados y contrastados por la comunidad científica. Por lo tanto, los métodos que se emplean habitualmente se deben interpretar con cautela y evaluando la aplicabilidad de las correlaciones utilizadas en el estudio de suelos a los residuos.

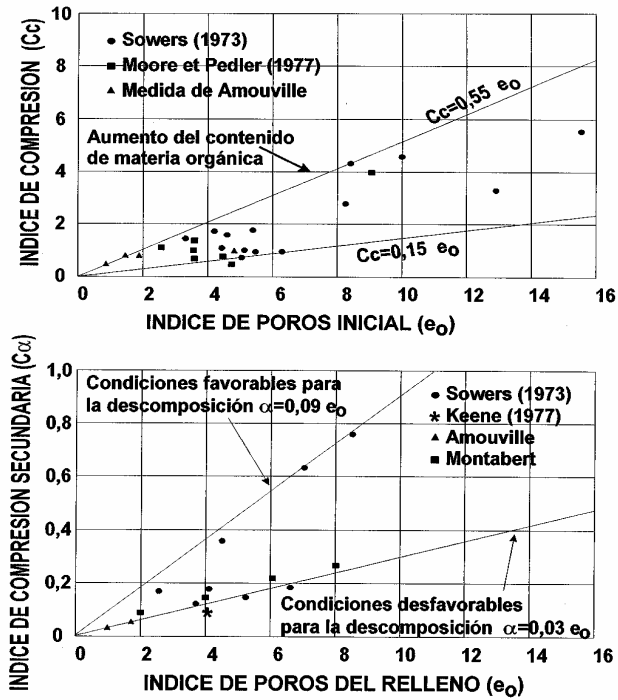


FIGURA 1. Parámetros deformacionales para rellenos sanitarios (Sowers, 1973)

Con posterioridad al planteamiento de Sowers se han desarrollado una serie de modelos conducentes al estudio de la compresibilidad de los rellenos. La mayoría de ellos se basa en las hipótesis iniciales planteadas por dicho autor. Una excepción a esto lo constituye el trabajo de Zimmeman, Chen y Franklin (1977), quienes plantean una ley de comportamiento que considera dos niveles de porosidad (macro y micro porosidad) en los residuos, y proponen una relación de la disipación de la presión intersticial con el tiempo.

Rao et al (1977), realizaron estudios en terreno y laboratorio, desarrollando una técnica para predecir asientos en vertederos sometidos a sobrecarga. Souza y

Rodríguez (1980) estudiaron la compresibilidad de un vertedero, considerando la forma de disposición de las basuras. Utilizaron dos sistemas diferentes: el primero consistió en depositar las basuras desde la parte superior de un talud, para luego compactar con maquinaria pesada desde arriba hacia abajo; en el segundo se depositaba la basura al pie del talud, compactando en tongadas con la misma maquinaria. Los asientos medidos con ambos sistemas disminuyeron de un 17 a un 5%, si se utilizaba el segundo método de compactación, lo que deja de manifiesto la importancia del proceso constructivo y de operación.

Bookter y Ham (1982), han estudiado el grado de descomposición de los residuos sólidos en rellenos sanitarios de U.S.A., para distintas condiciones y situaciones geográficas, llegando a desarrollar un método para conocer el grado de estabilización de la basura, útil para ayudar a predecir asientos.

Cartier y Baldit (1983) proponen una ley de variación de la densidad en función de la profundidad, de acuerdo a mediciones realizadas con densímetro nuclear. Además proponen parámetros para residuos sólidos, los que son de gran utilidad para aplicar al modelo propuesto por Sowers (1973) y han sido empleadas en varios diseños de vertederos en el mundo.

Así mismo Landva y Clark (1990), recomiendan el empleo de rellenos de prueba para evaluar la compresibilidad de los vertederos. Estos ensayos son muy eficaces, mientras que los ensayos geotécnicos convencionales de laboratorio, generalmente no son aplicables para rellenos de basuras, principalmente por el tamaño y heterogeneidad de los materiales.

En la U. Católica de Valparaíso (UCV) también se han realizado experiencias para obtener parámetros de diseño durante las etapas de operación de los vertederos El Molle de Valparaíso y Limache de la V Región (Espinace et al.1989). Las investigaciones en este último vertedero sanitario de baja densidad midieron asientos de alrededor del 30% de la altura inicial al cabo de 7 años. Estos valores coinciden con los obtenidos en otros vertederos de Chile, tales como "La Feria" o "Lo Errazuriz" en Santiago (Espinace et al, 1991) y los expuestos por Hinkle(1990).

Entre los modelos para el estudio de asientos, destacan la ley exponencial propuesta por Gandolla (1992), y el modelo Meruelo (Arias,1994),(Palma,1995). Este modelo es uno de los más avanzados actualmente y ha sido desarrollado en España, entre la Universidades Católica de Valparaíso y de Cantabria. Es el único modelo que considera en su planteamiento inicial y en su formulación, los fenómenos de degradación de la materia orgánica como causantes de los asientos secundarios no debidos a sobrecargas externas. Los parámetros fundamentales considerados son el tiempo, el contenido de materia orgánica en los residuos, la humedad y el ritmo de desarrollo de los procesos de degradación, entre otros.

Para el desarrollo del modelo de predicción de asientos se considera el proceso con un inicio definido, aplicado a una masa de material degradable también definida,

existente en el instante inicial, sin aportes adicionales de masa una vez que el proceso de degradación ha comenzado. El modelo incluye los aportes de masa que se producen durante la operación. Este planteamiento implica que para un período de tiempo prolongado, la materia orgánica biodegradable debería desaparecer en su totalidad. Sin embargo, se considera que una parte de los RSU no son orgánicos y no sufren degradación y por otra no toda la materia orgánica se degrada.

Actualmente, en la U.C.V. se desarrollan investigaciones iniciadas en 1996, que estudian la velocidad de estabilización y la modelación de los asientos registrados en experiencias a nivel de laboratorio y en un vertedero experimental a escala real. Se ha comparado el caso de vertederos operando con recirculación de lixiviados tratados en un digestor anaerobio, con el caso en que no existe ningún proceso de recirculación, empleando residuos sólidos representativos de país (Espinace et al 1997). A los asientos medidos, se han ajustado los modelos de Sowers y de Meruelo; se ha obtenido los parámetros para cada caso y se ha realizado una predicción de los asientos esperados. Los modelos geotécnicos utilizados se ajustan a las medidas reales y los parámetros obtenidos, permiten predecir los asentamientos que ocurrirán. Además se estudia la reducción en los tiempos de estabilización de la degradación de los residuos sólidos. Los resultados preliminares obtenidos del análisis de los asientos, indican que la recirculación de lixiviados tratados en un digestor anaerobio, provoca un aumento efectivo en los asentamientos de los rellenos de residuos sólidos. La causa del incremento de asentamientos no parece estar en un aumento de la actividad biológica, asociada a procesos de degradación, sino que parece estar en fenómenos de colapso del relleno, provocados por la adición de líquido a tasas que causan cambios a nivel estructural. Un indicador de la baja actividad biológica registrada en las experiencias, es la reducida producción de biogas en los rellenos, que se verificó durante la investigación, aunque en los digestores anaerobios utilizados para depurar los lixiviados, se registró una buena producción de biogas.

Otro tema de alto interés es **la capacidad de soporte de los vertederos sanitarios**. Ella, en general es reducida y dependerá de factores como espesor del suelo de cobertura, composición de los residuos sólidos, método de construcción y maquinaria utilizada entre otros. El factor más significativo es el espesor relativo de la capa superficial de suelo sobre el relleno sanitario más esponjoso y flexible. Cuando la cimentación es relativamente pequeña comparada con el espesor del suelo de cobertura o capa superficial, puede punzonar a través de la capa superficial y hacia el interior del relleno de residuos. Cuando la cimentación es algo mayor y el relleno de residuos no es significativamente menos débil que la capa superficial superior, la rotura puede ocurrir por rotación de un segmento de suelo de cobertura y del relleno actuando como unidad (Sowers, 1968).

Según este autor la capacidad de soporte está entre 0,25 y 0,40 kg/cm², advirtiéndose que los ensayos de placa de carga con placas pequeñas pueden ocasionar impresiones equivocadas en la capacidad de soporte de un relleno. Para Cartier y Baldit (1983) la capacidad portante está entre 0,25 y 1 kg/cm².

El CEDEX de España, plantea que las investigaciones realizadas hasta la fecha, indican que los RSU compactados tienen un comportamiento muy dúctil y no presentan una tensión de rotura determinada, sino que en la mayoría de los casos, se agota la capacidad de deformación de los sistemas de ensayo sin llegar a alcanzarse un valor de tensión constante. Por lo tanto, no es fácil definir valores de parámetros resistentes en rotura y hay que adoptar otros criterios como establecer límites en las deformaciones.

El comportamiento mecánico de los RSU ha sido comparado al de la "tierra armada" debido al efecto de los elementos fibrosos que se entrecruzan actuando como un refuerzo del material. Es por esta razón que únicamente se describen roturas con planos de cizalla a través de este tipo de materiales en casos de zonas especialmente debilitadas o debidas a pérdida de estabilidad por efecto del agua. En este sentido, se puede asumir que los residuos son materiales compuestos consistentes en una "matriz básica" que comprende las partículas medias y finas, más semejante a un suelo y cuyo comportamiento es friccional y en una "matriz reforzada".

Entre las experiencias desarrolladas en terreno, están los ensayos de penetración siendo los más ampliamente utilizados los de penetración dinámica. Estos permiten hacer evaluaciones cualitativas de la resistencia relativa del relleno a diferentes profundidades. Además repitiendo su realización periódicamente, se pueden contrastar ensayos realizados en diferentes ocasiones, lo que permite evaluar la variación de las características resistentes de un relleno en el tiempo o por un tratamiento de mejora. Resultados de esta aplicación fueron presentados por este autor en el IX Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, observándose que aún cuando el relleno prospectado puede ser muy heterogéneo, la serie de puntos de ensayo de un mismo sector arrojan resultados coherentes entre sí, lo que indica que la masa se comporta como un todo homogéneo, salvo en aquellos sectores en los que se encuentran residuos de características distinta a los residuos sólidos domiciliarios. Los ensayos de penetración dinámica realizados en el relleno sanitario "El Molle" de Valparaíso entre los años 1986 y 1990 para determinar su vida útil, no mostraron variaciones significativas en la resistencia a la penetración, lo que indica que el proceso de estabilización del vertedero es lento.

En Francia se han utilizado penetrómetros estáticos (Gouda) y presiómetros en el relleno sanitario de d'Arnouville-lès-Mantes (Cartier y Baldit, 1983). Los autores concluyen que ensayos de penetración estática pueden ser de utilidad para identificar zonas relativamente débiles dentro del vertedero o para evaluar cualitativamente si la resistencia al corte de los residuos cambia con el tiempo.

Otro de los ensayos muy empleado es el de carga en rellenos sanitarios. Varias investigaciones muestran experiencias de ensayos con placas convencionales de diferentes diámetro y ensayos de carga de grandes dimensiones. La

heterogeneidad de los residuos y su deformabilidad aconsejan realizar ensayos con placas de grandes dimensiones y mediciones de asiento prolongadas. Se recomienda una vez efectuado el ensayo, excavar calicatas para determinar algunos datos que tienden a no ser constantes como la composición de los residuos, espesor y tipo de suelo de cobertura, etc.

En el seguimiento geotécnico realizado por la Universidad de Cantabria en el relleno sanitario de Meruelo (Sánchez et al 1991), se efectuaron ensayos sobre placa circular de 45 cm. de diámetro, considerándose que con deformaciones del orden de 45 mm se alcanzaba la rotura. El valor medio de la carga de hundimiento fue de 2,00 kg/cm², para 30 cm. de espesor de cobertura. Con la hipótesis de que la forma de rotura fue por punzonamiento de la capa superior resistente, la resistencia al corte sin drenaje calculada corresponde a un valor de 0,3 Kg/cm² (análisis $\phi = 0$).

En la investigación efectuada en Benopolis, Brasil (Souza y Rodríguez, 1980) se realizaron ensayos de placa de carga con distintos espesores de cobertura, encontrándose un valor de 0,9 Kg/cm² para un espesor de cobertura de 25 cm y deformaciones de 25 mm. En esta investigación también se estudió el comportamiento de una edificación experimental de 30 m² de superficie, cimentada sobre una solera de hormigón armado de 0,07 m de espesor. La presión máxima sobre el terreno en las zonas de paredes fue de 0,65 Kg/cm² y la presión mínima en la zona central de la planta fue de 0,2 Kg/cm². En las mediciones efectuadas se registraron asientos de 8 cm. en 120 días y no se observaron grietas de importancia por efecto de asientos diferenciales.

En el relleno sanitario de Limache, la U.C.V. realiza desde 1989 el seguimiento del comportamiento de una vivienda experimental de 16 m², construida sobre un sector del vertedero de 6 años de antigüedad, siendo el espesor del relleno de 6 m. La edificación es de albañilería reforzada, con cimentación continua de hormigón armado, arrojada con escuadras de refuerzos. Las cargas transmitidas al terreno están entre 0,10 kg/cm² y 0,60 kg/cm². Los resultados preliminares mostraron un adecuado comportamiento estructural, con deformaciones asimilables por la construcción. Esta experiencia se detalla mas adelante.

En la actualidad la dificultad para encontrar emplazamientos de rellenos sanitarios se está superando con la ejecución de vertederos de gran altura, los que pueden ser construidos sobre uno ya existente o sobre un terreno apto. Entre los vertederos se deben distinguir aquellos en pendiente como los emplazados en quebradas y los de altura, propiamente dichos, construidos sobre terrenos planos o sobre un vertedero existente. Con el propósito de evitar problemas geotécnicos durante la fase de explotación y clausura, es necesario estudiar los aspectos geotécnicos relacionados con la **estabilidad de taludes**. Sin embargo, esta preocupación adquiere más fuerza cuando se trata del periodo de postclausura durante el cual no se tienen los resguardos de seguridad que existen en la etapa de explotación, en la que siempre hay una entidad responsable de dichos resguardos.

En el interior de la masa de residuos de estos vertederos, se pueden originar planos de rotura activos que alcanzan un desplazamiento progresivo. Los deslizamientos en estos rellenos generan fisuraciones y agrietamientos externos que dejan los residuos descubiertos y facilitan la introducción de agua superficiales que generan un incremento del desplazamiento, disminuyendo progresivamente la estabilidad. En algunos casos, se han producido deslizamientos causados por el peso propio, debido a que aunque el material de relleno es liviano en sí mismo, el suelo de cobertura y de las paredes de las celdas son más pesados.

Los deslizamientos más comunes presentan superficie de rotura aproximadamente circular. En vertederos en altura se dan dos mecanismos con rotura circular. Cuando el relleno de residuos sólidos es inestable, el deslizamiento ocurre en el talud del vertedero, con círculos de rotura que pueden ser superficiales de pie o de talud. Cuando el vertedero tiene altura excesiva y está cimentado sobre arcillas blandas, se puede producir una rotura general del suelo blando de cimentación causando una superficie de rotura de círculo profundo. De lo anterior se desprende que las causas de los deslizamientos en vertederos son diversas.

La estabilidad de los taludes en los rellenos sanitarios es evaluada generalmente por procedimientos geotécnicos convencionales. Los métodos más utilizados para la estabilización de taludes de RSU son Bishop y el de desplazamientos traslacionales, en una primera fase y de talud infinito en su etapa final y clausura. Los valores medios para taludes de rellenos sanitarios están entre 2-3:1 (H:V). La mayor dificultad que presenta el análisis de la estabilidad de estos taludes, con superficies potencialmente deslizantes, es la selección de los parámetros resistentes a emplear en los métodos tradicionales de cálculo.

Una vía para la obtención de parámetros de diseño, adicional a los ensayos de laboratorio, como edómetros de gran diámetro; de terreno como ensayos placa de carga, ensayos a escala real, prospecciones geofísicas o ensayos de penetración tipo SPT o CPT, es realizar cálculos "a posteriori" (back-analysis) a partir de campos de prueba y registros operacionales. La figura 2 muestra un resumen realizado por Palma(1995) de parámetros resistentes obtenidos desde diferentes fuentes.

Uno de los más recientes aportes a este tema es el de Hirata, T et al.(1995), los que dan a conocer una clasificación en cuatro grupos, de diferentes tipos de residuos en rellenos y su relación con propiedades mecánicas y condiciones de recuperación o saneamiento de vertederos. Algunos autores como Singh y Murphy (1990) cuestionan la utilización de los principios de la Mecánica de Suelos para la evaluación de la resistencia y estabilidad de los residuos sólidos. Argumentan que la teoría de Mohr-Coulomb puede no ser adecuada teniendo en cuenta que los residuos sufren grandes deformaciones sin llegar a rotura y la incompatibilidad entre los esfuerzos con deformación que producen rotura por corte en suelos y aquellos que producen rotura por corte en residuos. Esto indica que los análisis de estabilidad de vertederos de residuos está relacionada más con asentamientos y

capacidad de soporte de la cimentación que con la rotura de talud. Este criterio es similar al planteado anteriormente por el CEDEX.

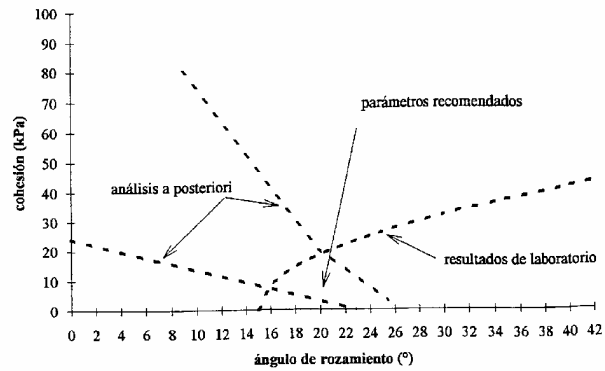


FIGURA 2. Parámetros resistentes en rellenos sanitarios (Palma, 1995)

CONSTRUCCION SOBRE RELLENOS DE RESIDUOS SOLIDOS EN CHILE

La alternativa de dar un destino para la construcción a los rellenos sanitarios, es una de las más utilizadas, sobre todo en países desarrollados donde antiguas zonas de vertido han quedado inmersas dentro del radio urbano. Existen variados casos, que han sido divulgados en la literatura especializada, sobre la cimentación de diversas estructuras en antiguos vertederos o rellenos sanitarios.

Durante los últimos años, ha sido común la presencia de patologías en construcciones de estructuras sobre antiguos vertederos sanitarios. Ellas están asociadas a problemas geotécnicos como baja capacidad portante y/o asentamientos inadmisibles, entre otros. Muchas veces, estas áreas han sido rellenadas para hacer uso de depresiones naturales, o como en el caso de Santiago de Chile, donde se recuperan grandes pozos abandonados de explotación de áridos.

Para el uso posterior de un antiguo vertedero sanitario, el manejo de gases y líquidos lixiviados, junto con los aspectos geotécnicos, son los principales problemas a resolver antes de decidir el uso que se dará al terreno. Dependiendo

del tipo de estructura que se requiera emplazar sobre el vertedero, las soluciones empleadas en el mundo para resolver los problemas derivados de los asientos y la capacidad de soporte han sido variadas. Entre ellas se puede mencionar:

- La remoción de parte o la totalidad de los residuos del antiguo vertedero y su reemplazo por material de mejor calidad, que se dispone en condiciones controladas y sobre el cual se cimienta la estructura.
- El mejoramiento del relleno de residuos sólidos, recurriendo a prácticas de estabilización geotécnicas como la compactación del relleno, la consolidación dinámica, la precarga u otros.
- La cimentación profunda mediante pilotes
- La disposición de una capa de sellado superficial, de suelo de buena calidad, debidamente compactado y sobre la cual se emplaza la estructura.

Entre las estructuras de uso comercial que se han emplazado sobre antiguos vertederos podemos mencionar, las de tipo vial como estacionamientos y vías de comunicación y las de tipo edificacional como galpones y edificios de todo tipo. En estos casos, el asentamiento que se puede alcanzar, es un dato que reviste gran importancia en comparación con las otras alternativas de utilización posterior de rellenos sanitarios.

En soluciones como calles o estacionamientos, los asientos pueden producir agrietamientos que dañan la superficie del pavimento, además de facilitar el ingreso de agua de escorrentía superficial al interior del relleno, afectando la base del pavimento y aumentando la generación de biogas y líquidos lixiviados. En este tipo de emplazamientos, si el recubrimiento y los residuos están bien compactados, es posible que el recubrimiento final de sellado sea menor. También es recomendable optar por pavimentos de tipo flexible, por su capacidad de adaptarse a los asentamientos superficiales del relleno.

La construcción sobre antiguos rellenos sanitarios exige que se consideren las restricciones geotécnicas y medioambientales que impone este tipo de terreno. Cuando se registren migraciones de biogas hacia edificios emplazados en el área ocupada por el relleno, será necesario instalar un sistema de ventilación de gas bajo el edificio. Cuando ocurran migraciones fuera del relleno, el sistema de ventilación se debe instalar en el perímetro del relleno con el objetivo de controlar la migración, tal como se ha hecho en los grandes vertederos de Santiago durante los últimos años.

Las primeras referencias chilenas de construcción sobre antiguos vertederos, se encuentran en el 2º Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica (1982), donde se cita el problema de fallas catastróficas por asientos diferenciales de cimientos apoyados sobre rellenos de basura no detectados, en algunos grupos habitacionales de Santiago. Posteriormente, en el VIII Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria, Fajardo M. (1989), planteó que en algunas comunas se ha

permitido edificar en terrenos que fueron rellenados con basuras, produciéndose con posterioridad, graves y variados deterioros en sus estructuras, interiores y redes de servicios. En particular, se estudia el caso de un conjunto habitacional en Santiago, determinándose que el 30% de las viviendas presentaban deterioros graves y sólo el 36% no presentaban deterioros visibles; se investigaron las causas que provocaron los daños de las construcciones mediante estudios de mecánica de suelos. En la última década, nuevos estudios muestran que existen varios casos donde se ha construido sobre sitios ocupados por antiguos vertederos, sin que haya existido un estudio riguroso previo (Conama, 1997).

Con respecto a actuaciones geotécnicas en la rehabilitación de vertederos, la situación en Chile hasta hace poco tiempo no presentaba los niveles de desarrollo conocidos para otras etapas del manejo integral de los residuos sólidos. Entre las primeras preocupaciones por investigar el tema, se tienen los trabajos presentados por la U.C.V. en los Congresos de Ingeniería Sanitaria de Viña del Mar y Temuco (Oyarzún, A. et al. 1979) y (Espinace R., 1983). Luego entre 1987 y 1991 se abordó en proyectos de investigación, el problema de la construcción sobre estos rellenos y se proponen parámetros y modelos de cálculo.

El antiguo relleno sanitario La Feria de Santiago, es un buen ejemplo, de sellado y reinserción de grandes rellenos sanitarios abandonados. Este vertedero recibió la mayoría de los residuos sólidos de la ciudad entre 1977 y 1984, siendo abandonado a fines de los años ochenta. El área primitivamente era un pozo de explotación de áridos de longitud aproximada a 800 x 400 m. y una profundidad media de 20 metros. Desde su clausura hasta el año 1993, el relleno sanitario en situación de abandono, se constituyó en una zona ubicada en el centro de un área poblacional, generando un impacto negativo, debido principalmente a su condición de lugar clandestino de acopio de residuos, foco de insalubridad y centro de acciones delictuales. El Ministerio de la Vivienda desarrolló a partir de 1993, el proyecto de sellado y reinserción a parque. El proyecto ha concluido en su primera etapa dando paso a un gran parque de 11,7 há. Además, se ha construido sobre el vertedero una importante conexión vial, donde a pesar de haber realizado una mejora del área ocupada consistente en la remoción de aproximadamente 1 metro de relleno y su reemplazo por material granular compactado, se presentaron asientos que han obligado a constantes reparaciones que deberán continuar hasta que se produzca la estabilización de los procesos de descomposición. El origen de los asientos, fue acentuado debido a un inadecuado manejo de las aguas de riego del parque y de las pendientes asignadas al proyecto.

La experiencia que el grupo de geotecnia de la UCV ha venido realizando desde 1989, en el modelo de edificación experimental de 16 m² de superficie, construida sobre el vertedero de Limache, ha tenido como objetivos principales, el estudio del comportamiento deformacional del relleno bajo cargas y el seguimiento del comportamiento estructural de la construcción. El propósito fue representar condiciones similares a las que se buscan en proyectos reales de rehabilitación, con condiciones de cimentación desfavorables.

La edificación experimental cuenta con una cimentación conformada por zapatas continuas de hormigón armado. Los muros son de albañilería en base a bloques macizos de hormigón, reforzados con pilares y cadenas de hormigón armado que conforman el entramado resistente. Se han dispuesto escuadras de refuerzo de fierro en todos los encuentros, con el propósito de dar un mayor arrostriamiento a la estructura, y pueda soportar de mejor manera los asentamientos diferenciales.

El diseño de la edificación experimental, que se presenta en planta y elevación en la figura 3, consideró transmitir al relleno diferentes estados tensionales ($0,1 \text{ kg/cm}^2$; $0,25 \text{ kg/cm}^2$; y $0,62 \text{ kg/cm}^2$).

Los resultados obtenidos a la fecha, muestran que la estructura se ha comportado satisfactoriamente, a pesar de los niveles de deformación que se han generado producto de los asentamientos diferenciales y las solicitaciones adicionales producidas por algunos movimientos sísmicos de mediana magnitud que se han registrado en la zona en los últimos 10 años. Las deformaciones registradas superan los 35 cm en las zonas de mayor carga y están sobre los 25 cm en las zonas de menor solicitación.

Desde el punto de vista de las patologías observadas en las estructuras, se puede señalar que en los elementos estructurales no se observan daños de consideración que comprometan la seguridad estructural de los mismos. El análisis individual de los elementos observados, conduce a que las patologías en los elementos de relleno (albañilerías de bloques de hormigón) producto del asentamiento diferencial, resultan ser fisuras escalonadas que siguen el material de unión de estos elementos, el cual presenta una menor resistencia mecánica que el bloque de hormigón.

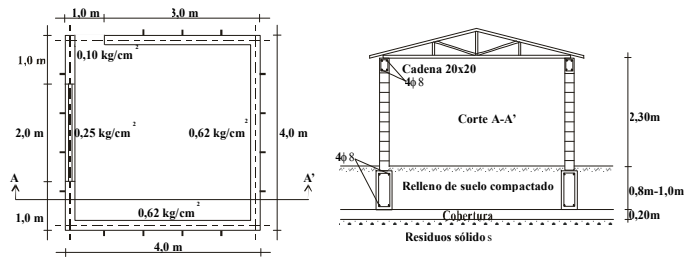


Figura 3 Planta y elevación de la edificación experimental

En algunos elementos estructurales, se han observado fisuras por corrosión. Estas, pueden ser producidas por la acción de los gases generados en el proceso de descomposición de la basura. La composición química del biogas, formada principalmente por Metano, Bióxido de carbono, Nitrógeno, Oxígeno, Sulfhídrico, sulfuros y disulfuros, amoníaco, hidrógeno, monóxido de carbono y trazas, facilita la corrosión de armaduras de los elementos estructurales. Tal efecto ha sido observado en los pilares de la estructura, los que en algunos casos presentan este tipo de fisuras. La presencia de este tipo de fisuras en los elementos verticales lleva a pensar que se encuentran además en los elementos de fundación, los que se sitúan en una zona de mayor susceptibilidad de ataque ácido. Este material agresivo, genera un aumento de volumen en la barra de acero, provocando un "descascamiento o desconchado" del hormigón de recubrimiento.

TENDENCIAS ACTUALES

Se ha señalado que durante los últimos años, la Geotecnia Ambiental ha tenido una creciente participación en los proyectos de diseño, operación y rehabilitación de vertederos y en la construcción sobre estos. Es claro que en los próximos años esta participación irá en aumento, sobretodo considerando los resguardos técnicos y medioambientales que se requerirán a futuro.

Recientes tragedias provocadas por deslizamientos dejan de manifiesto la importancia del papel de la geotecnia en estas obras. La mas reciente es el alud de basura que dejó mas de 40 muertos en un poblado de Manila en Filipinas en el mes de Julio del 2000. Allí, un gigantesco basural se derrumbó y enterró un grupo de precarias viviendas y sepultó unas 100 casas debido a las intensas lluvias provocadas por el tifón Kai-Tak. En el poblado de precarias viviendas viven más de 60.000 personas, que en su mayoría obtienen el sustento vendiendo objetos que rescatan de la basura. El vertedero absorbe un cuarto de las 4.500 toneladas de basura que producen cada día los habitantes de Manila, una ciudad con 10 millones de habitantes.

Por otra parte, importantes lecciones geotécnicas dejó el deslizamiento ocurrido el 27 de Septiembre de 1997 en el vertedero Doña Juana de Colombia, donde la masa deslizada cubrió aproximadamente 10 hectáreas y los desechos llenaron varios cientos de metros de un Río cercano a un área poblada.

Allí, en el análisis de estabilidad se asumió que la basura sólida tenía un ángulo de fricción efectivo de 28° , una cohesión efectiva de $2,5 \text{ t/m}^2$, y un peso unitario total de $1,2 \text{ t/m}^3$. Los análisis de estabilidad fueron realizados presumiendo superficies de falla circulares, (método de Bishop); y superficie de fallas translacionales (método de Janbu). Los diseños preliminares indicaban que para un mecanismo de falla circular el factor de seguridad oscilaba entre 1,4 y 1,5. Para el mecanismo de falla deslizante por traslación, la superficie de deslizamientos

supuesta se encontró en la base del vertedero a lo largo de la interfaz entre la geomembrana y los materiales granulares de la zona de recolección del lixiviado. Los resultados indican que el ángulo de fricción en la superficie de deslizamiento para un FS calculado de 1,0 fue de 22°, valor aproximadamente igual a la resistencia máxima de interfaz entre un material de geomembrana liso y el material granular de recolección de lixiviado.

El motivo principal de la falla se debe a que los lixiviados generados en el relleno no pudieron ser drenados adecuadamente y por consiguiente se empezaron a acumular desde el comienzo de la operación. Ello debido a que los filtros quedaron parcial o totalmente llenos. Razón fundamental es que existía recirculación de lixiviados funcionando ininterrumpidamente, siendo incorporados a la masa, en todos los niveles de las celdas. Al no existir salida, el líquido se fue acumulando en los vacíos del vertedero, haciendo subir la posición del nivel de la superficie libre y aumentando las presiones neutras. Esta acumulación contribuyó al aumento de presiones internas de gases debido a que los lixiviados dentro del relleno no permitían el flujo normal de los gases hacia la superficie y chimeneas. Estas presiones de gases disminuyeron aún más la capacidad de drenaje de los lixiviados. La acumulación de lixiviados y las presiones del biogás dentro del relleno se incrementaron con el tiempo, causando igualmente una disminución con el tiempo de los factores físicos que favorecen la estabilidad del relleno, disminuyendo las fuerzas resistentes sobre las superficies del deslizamiento y aumentando la masa y el impulso de la masa de la basura.

Los aspectos del diseño, operación y construcción que pudieron causar las excesivas "presiones de poros" fueron: La capa de protección ubicada en la parte superior de los filtros y tuberías de fondo que contribuyó significativamente a la reducción de la capacidad de drenaje de los lixiviados; Las capas intermedias de baja permeabilidad que contribuyeron a la deficiencia del drenaje de los lixiviados dentro del relleno; Las concentraciones de hierro y calcio en los lixiviados que colmataron la capa de protección de los drenajes de fondo; La falta de implementación de un sistema de extracción forzada de gases que influyó en la concentración de estos en el relleno; Las bolsas plásticas sin romper y compactadas que pudieron afectar localmente el drenaje de los lixiviados y gases.

Esta experiencia demuestra que el diseño y operación de los rellenos sanitarios son campos de la ingeniería y la ciencia relativamente nuevos y no se ha establecido en forma definitiva los criterios y procedimientos que se deben seguir. La operación de un Relleno Sanitario es algo de mucho cuidado, no es solamente colocar basura siguiendo un diseño, sino también analizar las fisuras, los caudales de todos los efluentes, los análisis físicos y químicos, las cantidades de basura que se colocan, entre otros, para prevenir desastres. El insuficiente desarrollo de la ingeniería práctica en estos aspectos exige el establecimiento de medidas preventivas durante la operación del relleno, especialmente cuando se incluye un proceso relativamente nuevo como la recirculación de lixiviados.

Es fundamental en estos casos contar con medidas preventivas y de control durante la operación del relleno, como por ejemplo: instrumentar los Rellenos Sanitarios con piezómetros, inclinómetros y redes topográficas, para controlar, los movimientos de estas grandes masas; sistemas de control entre los lixiviados producidos y recolectados que permitan determinar la acumulación de líquido en el relleno y la factibilidad de la recirculación de estos; elementos de medición de presiones internas dentro del relleno en áreas críticas; elementos de presión de gases dentro del relleno que permitan establecer las modificaciones necesarias en el sistema de alivio; un programa de Seguridad Geotécnica que permita establecer la importancia de cada uno de los factores enunciados anteriormente. En los estudios de Impacto Ambiental se debe incluir, como factor importante, el análisis de la estabilidad de los taludes.

Como medidas de precaución para evitar este tipo de fallas geotécnicas se debe tener presente que en la actualidad todos los Rellenos Sanitarios, recientes o antiguos están saturados o próximos a la saturación y por tanto deben ser drenados a corto plazo. Además todas las lagunas existentes sobre la masa de la basura deben ser secadas. Para evitar posibles fallas donde el principal motivo es el aumento de la presión intersticial, es indispensable que se cuente con sistemas de drenaje interno de los líquidos y secundariamente de los gases. Se recomienda, entre otros, la ejecución de trincheras, galerías de drenaje y drenes horizontales de alivio.

Por otra parte, en algunos antiguos vertederos donde se han realizado proyectos de reinserción después de varios años de abandono, la participación geotécnica ha consistido principalmente en el reconocimiento del subsuelo generalmente mediante calicatas y ensayos de penetración dinámica; la caracterización de los materiales a través de ensayos de laboratorio; la estimación de la deformabilidad principalmente aplicando los modelos planteados por Sowers (1973), y últimamente modelos de tipo exponencial. La capacidad portante se ha estudiado principalmente a través de ensayos de placa de carga, ensayos de carga en canchas de prueba, y el seguimiento del comportamiento de estructuras experimentales. El análisis de la estabilidad de taludes tanto en condiciones drenadas como no drenadas, se ha realizado principalmente mediante back analysis.

Se ha podido comprobar que la alternativa de construir, sobre estos terrenos es factible siempre que se cuente con los estudios previos necesarios y se consideren los resguardos aquí mencionados. Se mantiene la incertidumbre de cual será el comportamiento de las estructuras construidas en países con importantes ante eventos sísmicos, los que no se han presentado en la zona central de Chile en los últimos 15 años.

El Comité Técnico TC 5 de la ISSMGE cuenta con un subcomité (SC 9) dedicado al estudio del comportamiento de los vertederos sanitarios ante condiciones de carga extrema, como los terremotos. Entre los mecanismos de falla que se recomienda emplear se mencionan: deslizamientos, distorsiones de corte de

vertederos o suelo de fundación; rotura del suelo de cobertura; rotura de los taludes internos del vertedero; fallas en el sistema de recolección del gas; roturas en las geomembranas; roturas en el vertedero por fallas en el suelo de fundación; movimientos tectónicos del subsuelo; licuefacción del vertedero o suelo de fundación. Este Comité recomienda emplear aceleraciones de diseño de 0.2 g para dar seguridad al comportamiento del vertedero sanitario. Este valor podría ser aún insuficiente en países de alta sismicidad.

Es claro que el conocimiento actual sobre la conducta geotécnica en vertederos sanitarios es aún insuficiente y se requieren mayores investigaciones sobre el tema. De igual forma, el comportamiento de los vertederos sanitarios durante un terremoto, deberá ser motivo de futuras investigaciones, mediante el análisis de métodos experimentales y matemáticos.

REFERENCIAS

- Arias, A., (1994), "Modelo de Asentamiento de Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos". Tesina de Magister en Ingeniería Sanitaria y Ambiental D.C.T.A. y M.A., Universidad de Cantabria, España..
- Cartier, G., y Baldit, R., (1983) "Comportement Géotechnique des Décharges de Residus Urbains". Bull. Liaison, Lab. C. Ponts et Chaussées, 128, Nov-Dec, pp. 55-64.
- Espinace, R., (1983) "Compresibilidad de Vertederos Sanitarios" y "El Vertedero Sanitario y su Empleo como Suelo de Fundación", V Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria y del Ambiente, celebrado en Temuco.
- Espinace, R. et al. (1989) "Recuperación de Vertederos Sanitarios. Caso Vertedero Experimental de Limache. Chile". 1º Congreso de Ingeniería Ambiental Bilbao, España.
- Espinace, R., Palma J., (1990) "Problemas Geotécnicos de los Rellenos Sanitarios", Revista Ingeniería Civil del CEDEX, N°77, Edición Octubre, Noviembre y Diciembre de 1990, Madrid, España.
- Espinace, R. Díaz, I., Palma J., (1991) "Propiedades Mecánicas del Relleno Sanitario de Limache". IX Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Viña del Mar.
- Espinace R., Caffarena J., Palma J. (1999) "Patologías en Construcciones Sobre Areas Impactadas por el Vertido de Residuos Sólidos". V Congreso Iberoamericano de Patología de las Construcciones, Montevideo, Uruguay.
- Fajardo, M., (1989), "Edificación en rellenos artificiales formados por basuras". VIII Congreso chileno de ingeniería sanitaria y ambiental. La Serena, Chile.
- Gandolla, M., Dugnani, L., Bressi, G., y Acaia, C., (1992), "The determination of subsidence effects at municipal solid waste disposal sites". Proc. Int. Solid Waste Association Conference. pp. 1-17 (sin paginar), Madrid, Junio.
- German Geotechnical Society for ISSMFE., (1991), "Geotechnics of Landfills and Contaminated Land Technical Recommendations GLC". Ernest y Sohn, Berlín.

- Hinkle, R.D., (1990), "Landfill site reclaimed for commercial use as container storage facility". Geotechnics of Waste fills - Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, editors, ASTM, Philadelphia, pp. 331-344.
- Hirata, T., Hanashima M., Matsufuji, Y., Yanase, R., and Maeno Y., (1995), "Construction of facilities on the closed landfills". Sardinia 95. Fifth International Landfill Symposium, (1995), editorial CISA, Italia.
- Landva, A.O., y Clark, J.I., (1990), "Geotechnics of waste fill". Geotechnics of Waste fills -Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, editors, ASTM, Philadelphia, pp. 86-103.
- Oyarzún, A., y Rojas, L., (1979), "El Relleno Sanitario y la Posibilidad de Recuperación y Utilización de un Suelo". Síntesis título U.C.V., Chile.
- Palma J.H. (1995). "Comportamiento geotécnico de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos". Tesis doctoral, U. de Cantabria, Santander, España.
- Rao, S.K., Moulton, L.K., Seals, R.K., (1977), "Settlement of refuse landfills". Proc. Conf. on Geotechnical practice for disposal of solid waste materials, U. of Michigan, ASCE, pp. 574-598.
- Sánchez Alciturri, J.M., Palma, J.H., Sagaseta, y C., Cañizal, J., (1991), "Aspectos geotécnicos del vertedero sanitario controlado de Meruelo". Revista técnica del Medio Ambiente, 25 Nov.-Dic., pp. 101-108.
- Souza, O., y Rodríguez, M., (1980), "Aterro Sanitário Aspectos estruturais e ambientais". Boletín de la Asociación Brasileña de limpieza pública, pp. 7-94.
- Sowers, G.F., (1968), "Foundation Problems in Sanitary Landfills". Journal of the sanitary division, ASCE, vol. 94, N° SA1, pp. 103-116.
- Sowers, G.F., (1973), "Settlement of waste disposal Fills". 8a Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineerings, vol. 2, Moscú, pp. 207-210.
- Zimmerman, R.E., Chen, W.H., Franklin, A.G., (1977), "Mathematical Model for Solid Waste Settlement". Proc. Conf. on Geotechnical practice for disposal of solid waste materials. Univ. of Michigan, ASCE pp. 210-226.