

V-Palma-Chile-1

ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DE RELLENOS SANITARIOS

Palma G. Juan H. ⁽¹⁾

Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, Profesor Titular de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Es autor de diversos artículos relacionados con aspectos geotécnicos ambientales de depósitos de residuos sólidos urbanos y mineros. También es consultor de diferentes empresas de manejo de residuos sólidos, y de la minería.

Aplicar

Foto

Espinace A. Raúl

Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid, Profesor Titular de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Valenzuela T. Pamela

Ingeniero Constructor y Académico de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Dirección (1): Avenida Brasil 2147 – Valparaíso – V Región – Chile – Tel: 56 – 32 – 2273630 – Fax 56 – 32 – 2273808 – e-Mail: jpalma@ucv.cl

RESUMEN

Investigaciones realizadas por estos autores, confirman la tesis que es posible evaluar la estabilidad en rellenos sanitarios, analizando sus condiciones de equilibrio a partir de métodos geotécnicos tradicionales, aplicados a suelos. Además, mediante la interacción de ensayos y modelos geotécnicos convencionales, es posible obtener y evaluar los parámetros resistentes en el análisis de la estabilidad global.

El artículo presenta resultados obtenidos en el proyecto de investigación FONDEF D001101 “Metodología Integrada para rehabilitar rellenos sanitarios y tranques de relave”, realizado entre el año 2001 y 2004 en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Esta investigación consideraba entre sus objetivos, evaluar las condiciones de estabilidad de un relleno sanitario chileno a través de métodos de equilibrio límite, a partir del análisis de sus parámetros resistentes y su condición mecánica.

PALABRAS CLAVE: Rellenos sanitarios, estabilidad de taludes.

1. INTRODUCCIÓN

A partir de la aprobación de la ley 19.300 de bases del medio ambiente, la disposición final de residuos sólidos en Chile está sujeta al sistema de evaluación de impacto ambiental y por lo tanto, las instalaciones destinadas a tratar los residuos sólidos generados en las ciudades deben cumplir importantes exigencias técnicas, para proteger al ambiente y las personas. Debido a estos requerimientos, a la geotecnia ambiental le corresponde una activa participación tanto en la etapa de selección del emplazamiento, como en las de diseño, construcción, operación, cierre y rehabilitación. En Chile la tendencia actual, al igual que en países desarrollados, es construir rellenos sanitarios que presten servicios intercomunales, como el caso de los rellenos sanitarios Loma Los Colorados en Til Til, La Yesca en Rancagua, Santa Marta en Talagante y Santiago Poniente en Maipú, entre otros. En todos los casos se ha optado por alcanzar alturas importantes, con proyectos de ingeniería y costos que deben asegurar mínimos impactos sanitarios y ambientales.

En la etapa de operación de un relleno sanitario, se debe asegurar la correcta construcción y seguridad del mismo, para lo cual se deben integrar diferentes aspectos geotécnicos como: la estabilidad del suelo de fundación y la de los taludes, las características del material para el

recubrimiento de los residuos, determinación de la resistencia del relleno así como la evolución de los parámetros resistentes con el tiempo, análisis de la compresibilidad y tiempos de la estabilización de las deformaciones en los rellenos.

En Chile, los datos y parámetros geotécnicos que se han utilizado para el diseño de rellenos sanitarios se han obtenido o estimado, principalmente, a partir de información generada en investigaciones y trabajos llevados a cabo en el extranjero, lo que en algunos casos ha obligado a realizar modificaciones importantes y de alto costo en el diseño de la ingeniería y las obras de construcción. Por lo tanto, considerando que los proyectos de ingeniería que se están realizando actualmente en Chile, deben cumplir con altos niveles de seguridad ambiental y sanitaria, se hace necesario generar antecedentes representativos de nuestra realidad, que permitan evaluar las condiciones geotécnicas de los rellenos sanitarios nacionales.

Este artículo se centra en proponer una metodología para el estudio de la estabilidad de taludes, de rellenos sanitarios, desarrollada a partir de experiencias en estudios e investigaciones desarrolladas en los últimos 15 años.

2. METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA ESTABILIDAD DE UN RELLENO SANITARIO

La metodología aplicada permite obtener parámetros e información de un relleno sanitario, para analizar su compresibilidad, capacidad portante y estabilidad de los taludes. Específicamente, se propone un procedimiento que evalúa las condiciones de estabilidad por medio de un factor de seguridad, a partir del análisis de sus parámetros resistentes y su condición mecánica, utilizando métodos geotécnicos tradicionales.

2.1. OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN GEOTÉCNICA DE UN RELLENO SANITARIO

La validez y calidad de los análisis de estabilidad global de un relleno sanitario, dependen de la información obtenida relativa a las deformaciones, parámetros resistentes, presión intersticial, densidad, geometría, tipos de residuos, método de disposición, sistemas de drenaje de biogás y lixiviados, entre otros datos relevantes.

➤ Medición de movimientos del relleno.

Los métodos tradicionales registran los movimientos de puntos ubicados en la superficie del relleno, a través de mediciones topográficas que pueden emplear niveles, taquímetros o estaciones totales.

Para el estudio de los asentamientos a diferentes niveles en el interior del relleno se han implementado nuevas técnicas de seguimiento de los asentamientos, incorporando distintos dispositivos. Un estudio realizado en cinco rellenos sanitarios franceses puso a prueba la eficacia de distintos dispositivos utilizados en el monitoreo de los asentamientos (Gourc et al., 2001). En los rellenos sanitarios de Lapouyade, Torcy, Montreuil, Montech y Chatuzange junto con los puntos de medición de asentamiento superficiales, se instalaron dispositivos al interior de la masa de residuos como inclinómetros, esferas flotantes y platos telescópicos. Esto permitió, en algunos casos, contrastar en el mismo perfil las medidas topográficas superficiales con las internas. La principal ventaja de estos métodos es que permite la medición de asentamientos en el interior del relleno. Por el contrario, las principales desventajas son la dificultad de emplazamiento de los sistemas; en grandes rellenos la operatividad de estos sistemas es dificultosa; algunos de ellos son costosos y las actividades de operación del relleno pueden afectar su funcionamiento y/o integridad.

Para el estudio de los movimientos horizontales de los taludes en rellenos sanitario se aplican normalmente técnicas de medición topográfica basadas en triangulaciones precisas, siguiendo el desplazamiento de puntos ubicados a diferentes alturas sobre el talud.

➤ Densidad de los residuos.

Es importante conocer la densidad de los residuos y su variabilidad debido a la evolución de las propiedades resistentes en el tiempo. Las dificultades para evaluarla son:

- Separación de los residuos por la capa de cobertura diaria.
- Dificultad para calcular los cambios de densidad con el tiempo y la profundidad. La mayoría de los valores publicados corresponden a residuos cercanos o en la superficie.
- Determinación del contenido de humedad de los residuos sólidos urbanos (RSU).

El valor de la densidad tiene mayor utilidad si se precisan previamente algunas condiciones:

- Composición de los RSU, incluyendo caracterización del suelo de cobertura y contenido de humedad.
- Método de construcción del relleno y grado de compactación de los residuos.
- Profundidad a la que se registró la densidad.
- Edad del relleno.

Igualmente, la humedad de los RSU depende de factores vinculados entre sí, como:

- Composición inicial de los residuos sólidos.
- Condiciones climáticas locales.
- Procedimiento de trabajo (tipo y uso de cobertura diaria).
- Eficacia del sistema de manejo de líquidos lixiviados.
- Grado de humedad producido por los procesos biológicos que ocurren dentro del relleno.
- Cantidad de humedad eliminada con los gases generados.

Singh y Murphy (1990), Landva y Clark (1990), Siegel et al. (1990), Kavazanjian et al. (1995), y Fassett et al. (1994) sitúan los valores de densidad de los residuos en un rango entre 0,30 a 1,5 t/m³. Los distintos autores emplean estos valores para estimar la capacidad de rellenos y para estudios de estabilidad. Se puede asumir que los valores bajos corresponden a relleno con deficiente o nula compactación de los residuos. Los valores altos se pueden asignar a residuos antiguos bajo sobrecargas relativamente altas o rellenos modernos.

Fassett et al. (1994) en un intento por aclarar los factores que afectan a la densidad, han ordenado la información de acuerdo con la energía de compactación, contenido de humedad, edad y profundidad del relleno. La energía de compactación se ha separado en tres grupos: mala compactación, vinculada a poca o ningún tipo de compactación; compactación moderada, vinculada a rellenos antiguos; y buena compactación, que representa las prácticas actuales. En la figura 1 se presentan las densidades total y seca para cada uno de los grados de compactación.

	Mala compactación	Compactación moderada	Buena Compactación
Rango de densidad total (t/m ³)	0,30 - 0,94	0,52 - 0,78	0,89 - 1,07
Promedio de densidad total (t/m ³)	0,54	0,70	0,97
Rango de densidad seca (t/m ³)	0,19 - 0,35	0,35 - 0,54	
Promedio de densidad seca (t/m ³)	0,27	0,46	

Figura 1: Densidades en función del grado de compactación.

Fuente: Fassett et al. 1994.

La obtención de la densidad se puede determinar mediante ensayos de campo como celdas de control a escala real, pozos y calicatas de prueba, muestras obtenidas de sondeos, y determinación de la densidad in situ. También se puede estimar la densidad a partir de mediciones topográficas del volumen del relleno y contando con el registro en peso de los residuos y el material de cobertura que conforman el volumen medido. Otra vía consiste en determinar el peso específico de cada uno de los componentes de los residuos y estimar la densidad total empleando el porcentaje en peso de cada componente.

➤ Parámetros resistentes.

La evaluación de la estabilidad de un relleno sanitariamente controlado, en las etapas de diseño, operación y cierre, requiere el conocimiento del comportamiento esfuerzo-deformación, y resistencia-tiempo del material, formado por capas intercaladas de basura y suelo de cobertura. Para lograr esto, se puede recurrir a técnicas tradicionalmente empleadas en geotecnia. Sin embargo, la obtención de los parámetros resistentes de la masa de residuos sólidos es el paso más difícil del análisis.

Una primera opción sería la de adecuar ciertos ensayos de laboratorio con estos propósitos, pero tiene grandes limitaciones como muestras inalteradas difíciles de tomar y muestras preparadas en laboratorio sin posibilidad de reproducir adecuadamente las condiciones del relleno. Por esta razón, los ensayos in situ y las observaciones en rellenos reales son especialmente útiles para la evaluación del comportamiento mecánico de los residuos.

No se debe olvidar que la interpretación de los resultados de ensayos mecánicos a residuos, está sujeta a incertidumbre por la carencia de un modelo conceptual de comportamiento de este material. Usualmente el análisis se hace sobre la base de modelos y métodos establecidos para suelo, pero en realidad los RSU están compuestos por partículas individuales con una cierta trabazón. Al igual que en suelos, la resistencia de los RSU aparentemente aumenta con el incremento de la carga normal. Sin embargo, debido a su alto contenido de materia orgánica y su conformación fibrosa, los residuos sólidos se comportan más como un suelo orgánico fibroso que como un suelo ordinario.

Entre los factores que afectan las propiedades resistentes de los residuos están:

- El contenido de materia orgánica y fibras.
- La edad y el grado de descomposición de los residuos sólidos.
- Tipo y cantidad de suelo de cobertura
- La época en que se construyó el vertedero o relleno, que define entre otras cosas, el esfuerzo de compactación y la cantidad de suelo de cobertura.

De acuerdo con Howland y Landva (1992), la resistencia de los RSU es de carácter primariamente friccional. Sin embargo, Mitchell y Mitchell (1992) señalan que, aunque la naturaleza cohesiva de los residuos aún no ha sido adecuadamente caracterizada, es razonable incluir un componente cohesivo en las evaluaciones de resistencia al corte. Estos autores creen que probablemente no es una verdadera cohesión, sino el resultado de la trabazón y el traslape de las partículas que componen los desechos. La suposición se basa en que, en rellenos sanitarios se han observado cortes verticales de altura considerable, que permanecen estables por largos períodos de tiempo.

De este mismo modo, Kolsch (1995) introduce nuevos conceptos basado en los resultados otorgados por ensayos de corte y triaxial, llevados a cabo en residuos sólidos, determinando que el comportamiento de los rellenos sanitarios sería similar a los rellenos de tierra armada. Esta teoría considera que los materiales fibrosos (plásticos, textiles, etc.) presentes en la composición de los residuos, serían capaces de crear fuerzas de tracción que dependerán del vínculo de las fibras con la masa de residuos en función de la tensión normal actuante. De este modo, la resistencia al corte dependerá de dos etapas: la primera, referente a las fuerzas de fricción en el plano de corte y, la segunda, con respecto a las fuerzas de tracción de las fibras o cohesión de las fibras.

La figura 2 ilustra la interacción entre estas dos etapas, representada en una curva esfuerzo-deformacional, mostrando que para pequeñas deformaciones (Fase I) existe apenas una movilización de las fuerzas de fricción. A medida que la deformación va aumentando, las fibras comienzan a ser traccionadas (Fase II). Las fuerzas de tracción aumentan hasta alcanzar un valor máximo correspondiente a la resistencia a la tracción o vínculo de las fibras con la masa de residuos.

A partir de este valor (Z_{max}) comienza una reducción de las fuerzas de tracción donde las fibras son rasgadas y deslizadas (Fase III) hasta alcanzar el punto donde la resistencia al corte se limitará a las fuerzas de fricción (Fase IV). La contribución de cada una de estas fuerzas a la resistencia al corte variará de acuerdo con la tensión normal actuante.

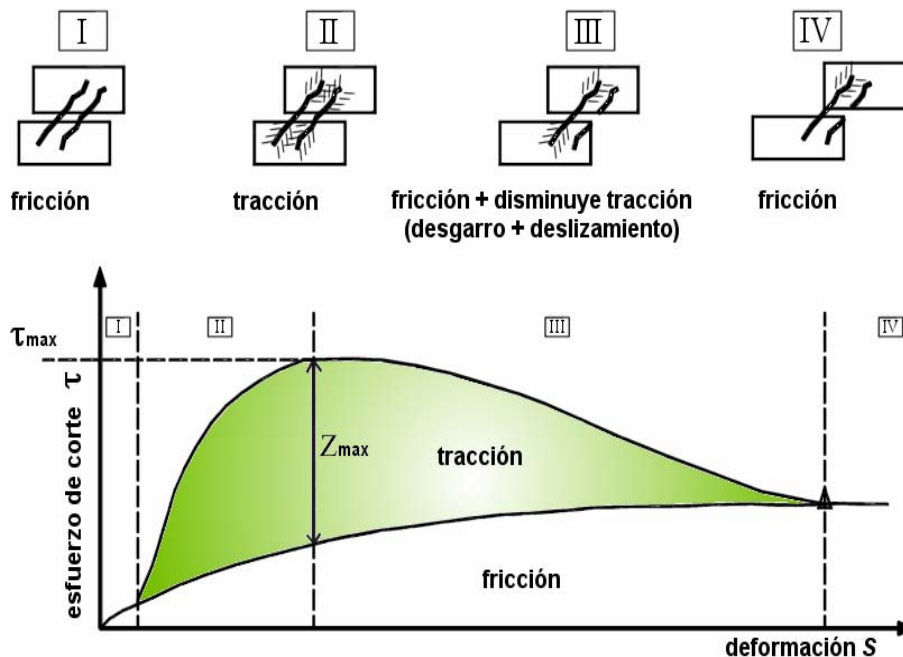


Figura 2: Comportamiento de los residuos bajo ensayos de corte, modelo de interacción entre las fuerzas de fricción y tracción.

Fuente: Kolsch, 1995.

La obtención de información a partir de ensayos de laboratorio requiere conseguir muestras representativas y ensayos en equipos de grandes dimensiones como las experiencias llevadas a cabo por Landva y Clark (1990), Richardson y Reynolds (1991), Jessberger y Kockel (1993) y Kolsch (1995). En los ensayos realizados por Landva y Clark, se empleó una caja de corte con sección de 434 x 287 mm. Los residuos sólidos ensayados presentaron, tanto en condiciones naturales como secos, valores de ángulos de fricción entre 24° - 34° con valores de cohesión entre 16 - 23 kPa. Richardson y Reynolds utilizaron una caja de corte directo de sección 1,5 x 1,5 m, encontrándose valores de ángulo de fricción entre 18° - 42°, con una cohesión de 20 kPa. Jessberger y Kockel encontraron en ensayos triaxiales, valores entre 17° - 22° con cohesión de 22 kPa. Kolsch realizó pruebas en una caja de sección 2 x 1 m, encontrando valores entre 15° - 22°, con valores de cohesión entre 15 - 18 kN/m² para residuos de menor y mayor edad respectivamente.

Otra vía para obtener parámetros resistentes consiste en realizar ensayos de campo, con lo cual se pueden obtener datos más cercanos a la realidad del relleno y establecer correlaciones con información obtenida en laboratorio. Entre las experiencias desarrolladas in situ, las más conocidas son los ensayos de penetración y los ensayos de carga que se han empleado ampliamente. Ambos ensayos han sido realizados en los rellenos sanitarios de Loma Los Colorados y Santa Marta, por investigadores del Grupo de Geotecnia de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV).

Los ensayos de penetración más utilizados son los de penetración dinámica, estos permiten trazar una distribución estratigráfica, al hacer evaluaciones cualitativas de la resistencia del relleno a la penetración relativa a diversas profundidades. Repitiendo su realización periódicamente y contrastando los resultados obtenidos, permiten analizar la variación de las características resistentes de un relleno en el tiempo. Entre los ensayos empleados, el penetrómetro Borros presenta ventajas como la simplicidad de manejo, la economía y la rapidez, además de ser muy utilizado en diferentes países. Este ensayo es asimilable al ensayo Standard Penetration Test (SPT) y resulta comparable con los ensayos de penetración normalizados por la International Society For Soil Mechanics And Geotechnical Engineering (ISSMFE).

En la investigación efectuada en el relleno sanitario de Monterrey Park, California, USA (Siegel et al.,

1990), se realizaron ensayos de penetración estática y piezocono, para definir la estratigrafía y las zonas saturadas del relleno. Al comparar los resultados obtenidos con clasificaciones de suelo, los residuos sólidos se comportarían como un suelo arenoso o limo arcilloso. Se concluye que al igual que los ensayos de penetración dinámica, los ensayos de penetración estática pueden ser de utilidad para identificar zonas relativamente débiles dentro de un relleno (estableciendo perfiles cualitativos o semicuantitativos) o bien, para evaluar cualitativamente si la resistencia de los residuos cambia con el tiempo. Los ensayos de penetración estática (CPT) se han empleado también en otras ocasiones para determinar, a través de correlaciones, la resistencia y la compresibilidad de los residuos (Hinkle, 1990; Oakley, 1990; Jessberger y Kockel, 1991). Sin embargo, la aplicación de correlaciones de suelos para estos materiales no puede considerarse viable salvo comprobaciones previas.

Como alternativa para la obtención de información in situ están los ensayos de carga, que son una ayuda eficaz para estudiar el comportamiento esfuerzo-deformación de los rellenos sanitarios, aunque según Sowers, la información debe ser manejada con precaución. La heterogeneidad de los residuos y su deformabilidad aconsejan realizar ensayos con placas de grandes dimensiones, lo que en estos casos es factible ya que no es preciso llegar a niveles de tensión excesivos y en consecuencia no se requieren grandes cargas. Los ensayos con placas convencionales pueden ocasionar interpretaciones equivocadas debido a la heterogeneidad de los residuos y su deformabilidad. Esto ha motivado el desarrollo de ensayos de carga de grandes dimensiones, esfuerzos aplicados pequeños y mediciones de asiento prolongadas. Ejemplo de esto se puede encontrar en Charles (1984) y Mcentee (1991), quienes recomiendan el empleo de contenedores metálicos utilizados habitualmente para almacenar escombros de construcción. El procedimiento de ensayo consiste en llenar el contenedor de arena y controlar los asientos del contenedor mediante nivelación topográfica, recomendándose efectuar medidas durante 100 días.

Finalmente están los estudios con prototipos de vivienda a escala real, que constituyen un procedimiento interesante para determinar el comportamiento de los rellenos bajo carga en períodos prolongados de tiempo, Souza y Rodríguez (1980), Espinace et al. (1992).

También se ha empleado para estimar parámetros resistentes, los análisis a posteriori o back analysis de roturas o ensayos de carga que satisfagan las condiciones de equilibrio en diversos rellenos. Es el resultado de utilizar un dato conocido (factor de seguridad de valor igual o superior a 1), para determinar los parámetros desconocidos Φ y c . Muchos estudios de estabilidad de taludes desarrollados por consultores para propietarios de vertederos, han utilizado los parámetros resistentes obtenidos de un ensayo de carga realizado en el relleno sanitario de Monterey Park, California (Singh y Murphy, 1990). Por otra parte, Dvirnoff y Munion (1986), han obtenido información adicional de la rotura del relleno Global en New Jersey, EE.UU. De acuerdo a lo publicado por Singh y Murphy (1990), también se han obtenido parámetros resistentes calculados a posteriori observando el comportamiento satisfactorio de muchos rellenos del sur de California, incluso durante terremotos. Con posterioridad a los terremotos se han efectuado back analysis de los taludes, y se han calculado los valores de la cohesión y el ángulo de fricción.

Palma (1995), realizó una compilación y comparación de los parámetros resistentes publicados en la literatura especializada, derivados de investigaciones a escala de laboratorio, ensayos in situ y análisis a posteriori de casos de rotura reales, concluyendo con una banda de parámetros resistentes recomendados para el diseño, que se presenta en la figura 3. En muchos casos, la resistencia al corte esta definida sobre la base de deformaciones inaceptables, antes que una verdadera rotura.

Los medios comúnmente utilizados en proyectos geotécnicos para la determinación de los parámetros resistentes como ensayos de laboratorio, ensayos in situ o cálculos a posteriori, deben ser utilizados con los criterios y consideraciones que cada situación exige.

En las investigaciones y estudios realizados por los autores en rellenos sanitarios chilenos, se han empleado técnicas medición y procedimientos de ensayos, similares a los expuestos anteriormente. La información obtenida a través de ensayos in situ y laboratorio, ha permitido establecer comparaciones y validar los resultados obtenidos.

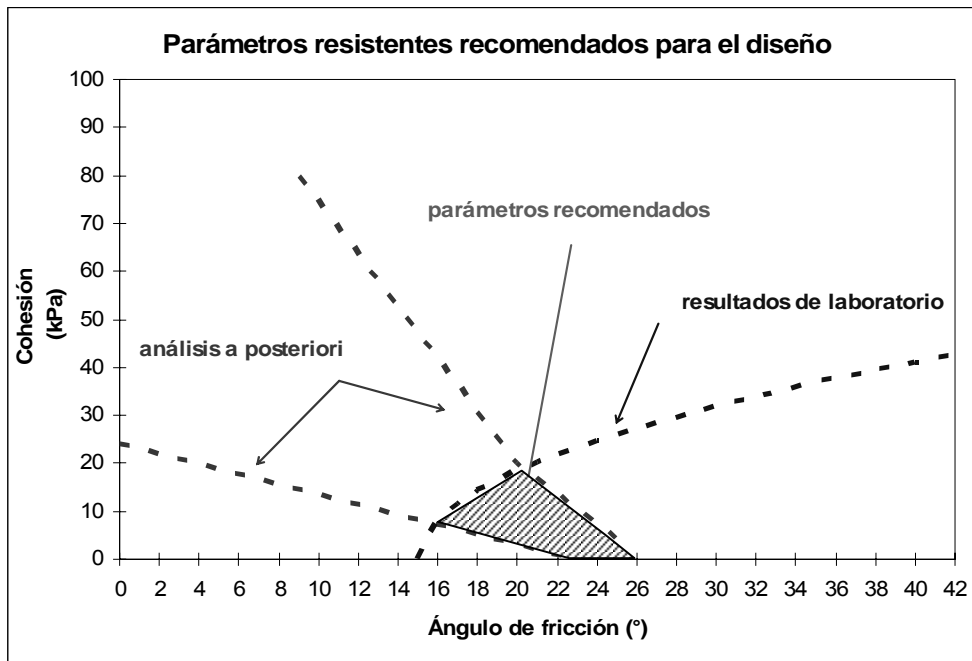


Figura 3: Parámetros resistentes para diseño en rellenos sanitarios.
Fuente: Palma J.H., 1995.

2.2. ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES

Actualmente en Chile, la dificultad para encontrar emplazamientos de rellenos sanitarios se está superando con la ejecución de rellenos de alturas importantes. Un relleno en altura puede estar construido sobre uno ya existente o en un terreno apto, lográndose la ventaja adicional de necesitar menor profundidad de cimentación, con lo cual las labores de sellado lateral y de fondo se deben hacer en un área menor con los beneficios que ello origina.

Entre los rellenos en altura se deben distinguir los emplazados en pendiente, los emplazados en vaguadas y en altura, propiamente tal, construidos en terrenos planos o sobre un relleno existente. Los esquemas de ambos tipos de rellenos pueden apreciarse en la figura 4.

La capacidad de estos rellenos aumenta en función de la altura y pendiente de sus taludes. Con el propósito de evitar problemas geotécnicos durante la fase de operación y cierre, se deben conocer los aspectos geotécnicos relacionados con la estabilidad de taludes.

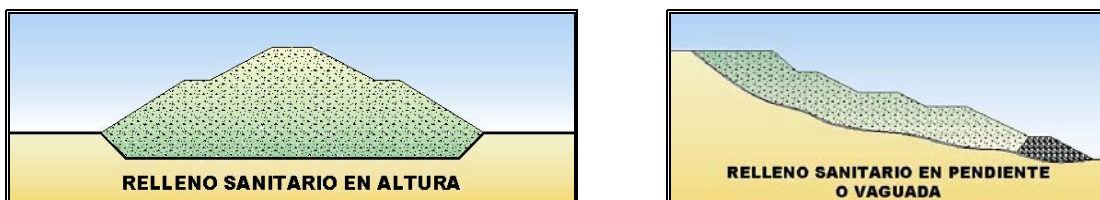


Figura 4: Rellenos sanitarios en altura.
Fuente: Palma J.H., 1995.

En la masa de residuos se puede producir un aumento de solicitaciones por el incremento del peso propio de los materiales a causa de alturas o pendiente excesivas de los taludes o saturación del relleno. También puede disminuir la resistencia al corte de los residuos en los procesos de descomposición. Todo eso da lugar a una redistribución de esfuerzos cortantes en el relleno, que pueden llegar a ser excesivos para la resistencia intrínseca del material y ocasionar deslizamientos durante la fase de explotación del relleno o después de haber sido cerrado. Por ello, en el interior de la

masa de un relleno con altura considerable, se pueden originar planos de rotura activos que alcanzan desplazamientos progresivos, los que generan fisuraciones y agrietamientos externos que dejan los residuos descubiertos y facilitan la introducción de aguas superficiales que generan un incremento del desplazamiento, disminuyendo progresivamente la estabilidad.

En resumen, la inestabilidad del cuerpo del relleno sanitario puede manifestarse de las siguientes formas (ver figura 5):

1. Fracturas en el subsuelo. Estas pueden causarse por diferencias de asentamientos en el subsuelo de fundación o porque la capacidad portante de éste se ve excedida.
2. Fracturas del talud. Estas podrían ocurrir cuando los taludes son demasiado inclinados.
3. Colapso de los muros de partida cuando se encuentran demasiado saturados o cuando no son capaces de sostener la presión de los residuos.
4. Capas de residuos que fluyen bajo el talud. Pequeños esfuerzos de corte, causados, por ejemplo, por un excedente de agua que podría llevar a las capas de residuos a fluir bajo el talud.
5. El suelo fluye o resbala bajo las capas de residuos. Debido a una insuficiente compactación o a una alta saturación.
6. Deslizamientos de residuos a lo largo de fracturas en el cuerpo del relleno, al existir asentamientos diferenciales que fracturarían zonas del relleno.
7. Inestabilidad de ciertas zonas construidas en el cuerpo del relleno. Ruptura de cañerías de drenaje u otras partes del relleno que podrían originar diferencias en asentamientos, llevándolos a la inestabilidad.
8. Inestabilidad en zonas de interfaces. Un sistema de sello generalmente consiste en uno o más suelos y/o materiales geosintéticos. La resistencia al corte de estos materiales y la fricción de cada interfaz como suelo/geosintético, suelos/residuos y geosintéticos/geosintéticos determinan cuan susceptible es a fallar en respuesta a las fuerzas generadas por el peso de los RSU.

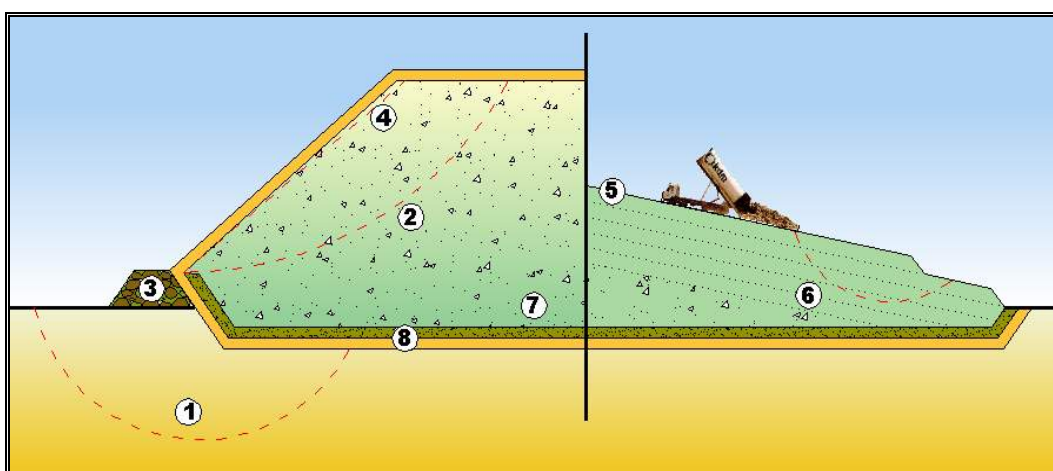


Figura 5: Inestabilidades en el cuerpo del relleno sanitario.

Fuente: Enviro Advice, 1997.

Para evaluar la estabilidad en los rellenos sanitarios, deben emplearse metodologías que consideren las particularidades del material. De acuerdo con Shafer et al. (2003), existen dos alternativas para el análisis de estabilidad:

- Métodos de equilibrio límite donde las consideraciones de deformación tienen una pequeña consecuencia.
- El método elástico donde la deformación y su relación con los esfuerzos son de gran importancia. Los modelos elásticos son muy complicados y generalmente muy complejos para usos prácticos y por consiguiente no se utilizan para realizar análisis de estabilidad.

Cuando se utiliza la alternativa de equilibrio límite, el factor de seguridad (FS) es un índice de la estabilidad respecto de la rotura. Un talud cercano a la rotura o al equilibrio límite tiene un factor de seguridad cercano a 1,0.

En los últimos años se han realizado evaluaciones o estudios de estabilidad de taludes que incorporan métodos tenso-deformacionales, que consideran las relaciones que sufre el material durante el proceso de deformación y rotura. Ellos son como un complemento al momento de realizar un análisis de estabilidad de taludes en rellenos sanitarios. A diferencia del método de equilibrio límite, que considera únicamente las fuerzas que actúan sobre uno o varios puntos de la superficie de rotura, suponiendo que la rotura se produce de forma instantánea y que la resistencia se moviliza al mismo tiempo a lo largo de toda la superficie, los métodos tenso-deformacionales analizan el proceso de deformación en cada uno de los puntos seleccionados del modelo. La precisión de los análisis de estabilidad es muy dependiente de la exactitud de las propiedades resistentes y de la geometría definida.

Quian et al. (2002) sugieren un factor de seguridad (FS) mínimo de 1,5 para el análisis de estabilidad. Shafer et al. (2003) sugieren un factor de seguridad para roturas, basado en la interface crítica del sello, en rangos de 1,4 suponiendo gran deformación, interface residual y resistencia de los residuos, a 1,5 suponiendo interface peak y resistencia de los residuos. Para rotura dentro de los residuos se considera un FS de 1,5 como condición final mínima aceptable. Para condición transitoria, normalmente son empleadas resistencias interface peak. Los FS para condiciones transitorias normalmente varían entre 1,2 a 1,3. Estos valores están en el rango de los valores referenciales empleados por los autores en cálculos de estabilidad realizados en rellenos sanitarios chilenos. De acuerdo con Shafer et al. (2003) el método de análisis seleccionado debe satisfacer el equilibrio de fuerzas y de momentos. Generalmente, se recomiendan los métodos de análisis de Janbu o Spencer.

En las evaluaciones de estabilidad realizadas a rellenos sanitarios chilenos, los supuestos considerados por estos autores han sido: determinar la geometría del relleno sanitario, asumir una condición homogénea del material del relleno, comprobar la situación del nivel piezométrico al momento del análisis y una selección de diversos parámetros resistentes, obtenidos a través de experiencias internacionales, ensayos de penetración, de carga o back analysis, entre otros datos relevantes para la evaluación. La estabilidad se ha estudiado mediante métodos de equilibrio límite, como el de Bishop modificado, Janbu, Spencer aplicando programas computacionales especializados. En el cálculo por medio de estos métodos, se supone una superficie de deslizamiento circular que se sabe ajusta bastante bien en la mayor parte de deslizamientos en suelos.

3. RESULTADOS OBTENIDOS DE INVESTIGACIONES EN CHILE Y RECOMENDACIONES DE OPERACIÓN Y MONITOREO

Respecto del comportamiento esfuerzo deformacional, los resultados de ensayos de placas de carga realizados en el relleno sanitario Loma los Colorados, en el marco del proyecto FONDEF D0011101 (Aguilera y Galeas, 2005), indican para el caso de placas dispuestas directamente sobre residuos, un comportamiento relativamente lineal hasta el escalón máximo, con ausencia clara de rotura, es decir, existe proporción entre los esfuerzos aplicados y la deformación producida. El conjunto cobertura-residuos presenta una curva de tenso-deformacional que exhibe una primera etapa de respuesta elástica, hasta que se produce el punzonamiento de la cobertura. Luego, se establece un asiento lineal correspondiente a la deformación del estrato de residuos, que absorbe íntegramente el incremento de la carga aplicada, sin colaboración adicional de la cobertura (ver figura 6).

Los ensayos de penetración dinámica realizados a grandes rellenos sanitarios de Chile, muestran curvas que indican que existe homogeneidad en la resistencia a la penetración con la profundidad, aumentando progresivamente y de forma lineal con la profundidad, ver figura 7. Asimismo, en investigaciones anteriores, Espinace et al. 1992, hemos planteado que existe un aumento de la resistencia a la penetración en el tiempo. Esto se refleja en los estados de alta densificación del relleno, expresado a través de la relación propuesta por Terzaghi y Peck (1967) entre la densidad relativa (D.R.) y el número de golpes NSPT.

De acuerdo con lo anterior, en los proyectos en los que ha participado el Grupo de Geotecnia de la PUCV aplicados a los más importantes rellenos sanitarios de Chile, se han recomendado una serie de medidas de operación destinadas a asegurar su estabilidad, considerando que según experiencias

nacionales e internacionales, uno de los motivos principales de la baja estabilidad, se debe a que los lixiviados generados en el relleno, si no son drenados adecuadamente, se produce una acumulación de ellos, lo que junto a las presiones del biogás, elevan las presiones intersticiales causando una disminución con el tiempo de los parámetros mecánicos (ángulo de rozamiento y cohesión) que contribuyen a la resistencia y estabilidad del relleno, disminuyendo las fuerzas resistentes sobre las superficies del deslizamiento y aumentando el peso de la cuña deslizante de basura.

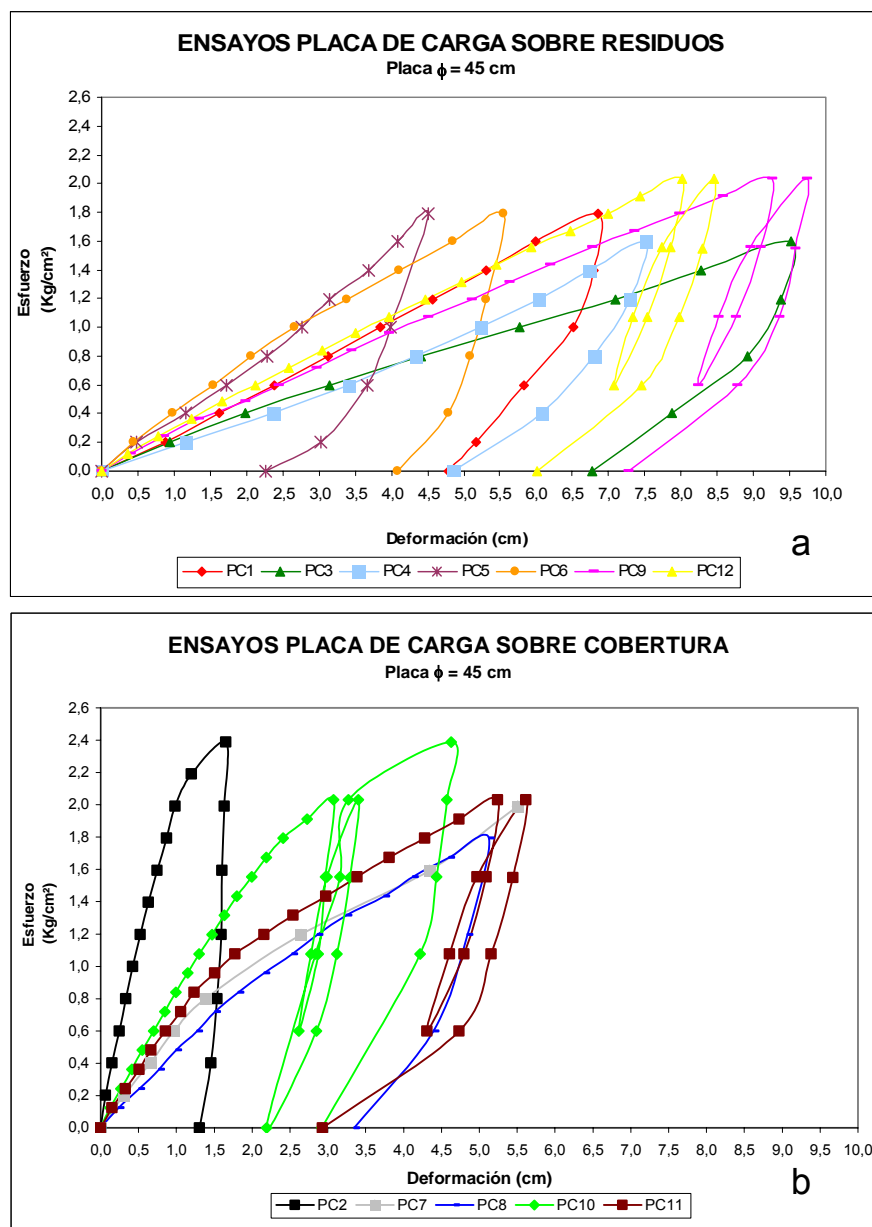


Figura 6: Resultados ensayos de placa de carga (placa 45 cm); a) sobre residuos; b) sobre cobertura.

Fuente: Aguilera, Galeas, 2005.

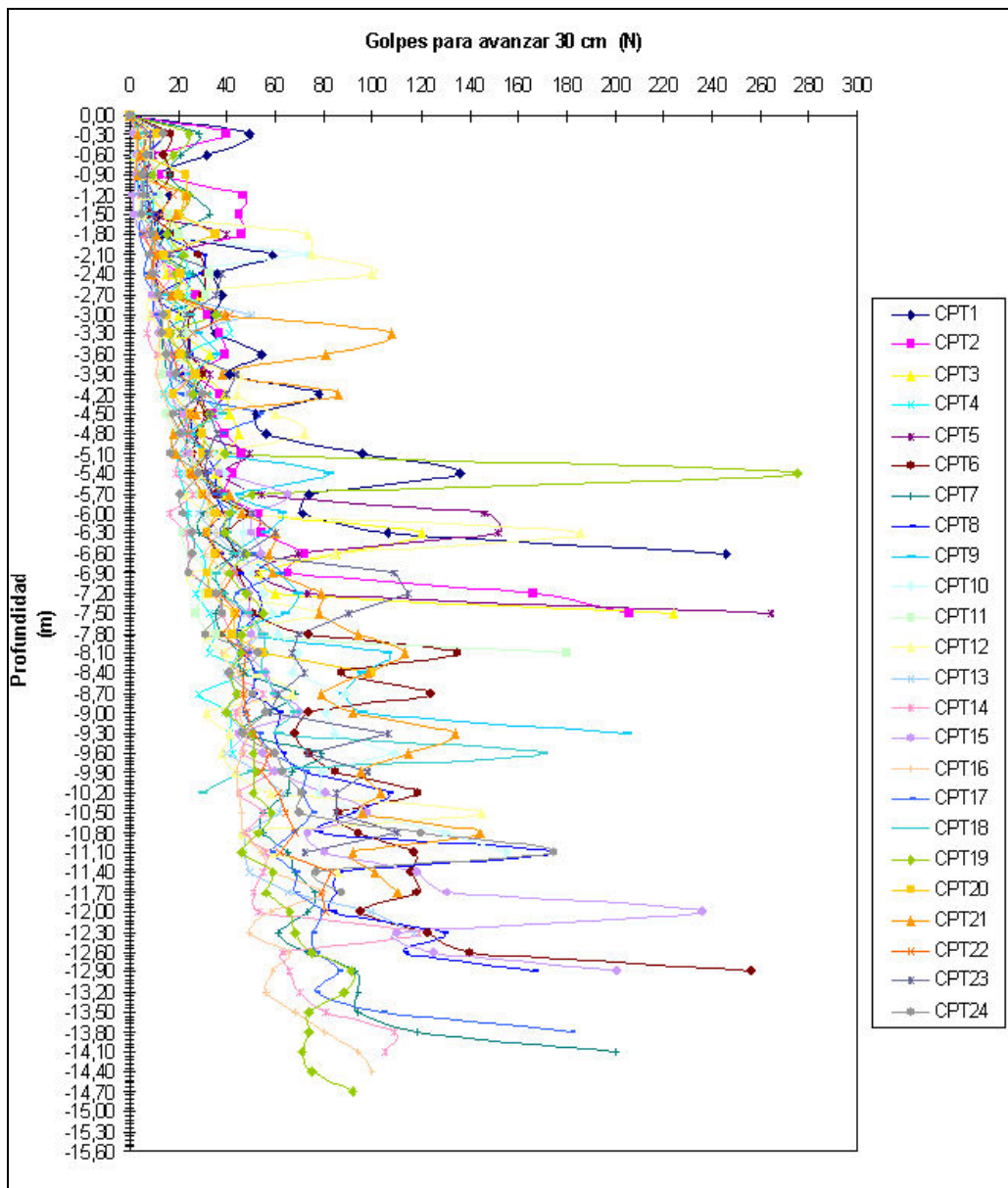


Figura 7: Resumen de ensayos de penetración dinámica.

Fuente: Aguilera, Galeas, 2005.

Entre las medidas de operación propuestas, para mantener la estabilidad de la masa de residuos dentro de rangos aceptables, se destaca:

- Dado que, en muchos casos los Rellenos Sanitarios, recientes o antiguos, tienden a estar saturados o próximos a la saturación, se debe poner especial atención al drenaje de los lixiviados para reducir el nivel de las presiones intersticiales. Para ello, se recomienda, entre otros, la ejecución de trincheras o drenes horizontales de alivio. La tasa de drenaje de líquidos se debe realizar con un control en base a mediciones topográficas de los asentamientos que se produzcan y piezométricas de la variación del nivel freático.
- Todas las lagunas o “pozas” existentes sobre masas de residuos, deben ser secadas, tratadas o agotadas.
- Evaluar permanentemente la eficiencia de los sistemas de drenajes de biogás, dado que las condiciones de desgasificación de los rellenos sanitarios, muchas veces no operan en forma óptima, por lo que es posible, que las presiones del biogás generen pérdidas en la resistencia al

- corte de la masa del relleno. Los sistemas de drenaje de biogás, se deben mantener libres de líquidos, de manera de permitir una ventilación permanente de gas en forma pasiva o activa.
- Evaluar permanentemente la geometría y movimiento de los taludes del relleno sanitario, con el propósito de evaluar el cumplimiento de dicha geometría con el diseño original o reformulado. Para ello es necesario contar con una zona segura en el relleno sanitario para la ubicación de los puntos de control de asentamientos, para que así no sufra alteraciones producto del paso de la maquinaria y que pudiese perjudicar la posición de éstos.
 - El espesor del material de cobertura, no debería sobrepasar capas de 15 a 30 cm de espesor, procurando utilizar materiales de permeabilidad alta. En el caso que sea necesario aplicar una cobertura de espesor mayor, en áreas de abandono temporal, se deberá recuperar el espesor de diseño de cobertura diaria no mayor a 30 cm antes de construir una celda adyacente o superior.
 - Se debe contar con medidas de monitoreo y control periódico, entre las que se destacan: sistemas de medidas de deformaciones tales como redes de inclinómetros y/o seguimiento de los datos aportados por redes topográficas; un acabado seguimiento en los piezómetros instalados y análisis de los sistemas de control entre los lixiviados producidos y recolectados, que permitan determinar la acumulación de líquido en el relleno; implementación de elementos de medida de presión de gases dentro del relleno, considerando como fuentes las chimeneas de ventilación pasiva; sistema de extracción forzada; superficies de cobertura; tuberías basales colectoras de lixiviado; y superficies de acumulación de lixiviados. La obtención de una base de datos con suficiente información permitiría modelar, predecir y optimizar la producción de biogás. En resumen, se propone contar con un programa de Seguridad Geotécnica que permita evaluar la información registrada y establecer la importancia de cada uno de los factores enunciados anteriormente.

4. CONCLUSIONES

Se ha presentado una propuesta metodológica que permite evaluar la estabilidad mecánica en rellenos sanitarios chilenos en las etapas de diseño, operación y cierre. El procedimiento propuesto evalúa las condiciones de estabilidad de un relleno sanitario, a partir del análisis de los parámetros resistentes y su condición mecánica, utilizando métodos geotécnicos tradicionales.

La calidad de información de las mediciones sobre la geometría y deformabilidad de un relleno sanitario, debe representar de manera fidedigna el real comportamiento del relleno, procurando evitar inconsistencias como cambio de precisión en los instrumentos de medición, intervenciones operacionales que puedan afectar la posición de los puntos de medición, y pérdida en la continuidad de las mediciones, entre otros aspectos.

En la masa de residuos sólidos se puede producir un aumento de solicitaciones por efecto del incremento del peso propio de los materiales, ya sea por altura o pendientes excesivas de los taludes, o saturación del relleno. También puede disminuir la resistencia al corte de los residuos en los procesos de descomposición, lo que da lugar a una redistribución de esfuerzos cortantes, que podrían llegar a ser excesivos para la resistencia intrínseca del material y ocasionar deslizamientos durante la fase de explotación o después de haber sido cerrado. Resulta entonces, de vital importancia realizar análisis de control de la estabilidad de taludes y evaluar de manera constante una serie de factores que pudiesen actuar individual o grupalmente ocasionando inestabilidad en el cuerpo del relleno.

A continuación se resumen las principales recomendaciones propuestas por estos autores, para determinar la estabilidad de rellenos sanitarios, empleando una metodología de bajo costo, aplicable a la realidad de países como Chile:

- En la etapa de diseño, se debe determinar la geometría del relleno sanitario que certifique Factores de Seguridad dentro de los rangos propuestos anteriormente. En las etapas de operación y cierre, se debe verificar detalladamente que la geometría existente proporciona una seguridad adecuada.
- Para verificar una condición homogénea del material del relleno, se debe evaluar la información relativa a los residuos dispuestos y ejecutar ensayos de campo, como ensayos de penetración dinámica, calicatas u otros.
- En la etapa de diseño, se deben determinar los niveles piezométricos del relleno sanitario que

certifiquen Factores de Seguridad dentro de los rangos propuestos anteriormente. En las etapas de operación y cierre, se debe verificar permanentemente que dichos niveles proporcionan una seguridad adecuada.

- Se deben seleccionar los parámetros resistentes a emplear en el análisis, a través de experiencias internacionales, ensayos de penetración, de carga o back analysis, entre otros datos relevantes para la evaluación. Si es posible, se puede considerar la ejecución de ensayos de carga a gran escala, con el objeto de establecer mayores rangos de esfuerzo que permitan definir aún más el comportamiento esfuerzo-deformacional de los residuos.
- Se debe determinar la estabilidad mediante métodos de equilibrio límite, como el de Bishop modificado, Janbu, Spencer aplicando programas computacionales especializados.

Más allá de las recomendaciones mínimas propuestas por estos autores, que se deberían realizar en todos los rellenos sanitarios, el Comité Técnico TC 5 de la ISSMGE que cuenta con un subcomité (SC 9) dedicado al estudio del comportamiento de los rellenos sanitarios ante condiciones de carga extrema, como los terremotos, ha recomendado evaluar otros mecanismos de falla que se podrían presentar en estos rellenos como: 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 suelo de fundación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan su agradecimiento a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) y a la Empresa KDM S.A., por el financiamiento y la colaboración prestada a las investigaciones realizadas en el proyecto FONDEF D0011101 "Metodología Integrada para Rehabilitar Rellenos Sanitarios y Tranques de Relave". También desean expresar su reconocimiento a la Dirección de Investigación de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguilera, K, Galeas, E., 2005, "Estudio de la estabilidad mecánica de los rellenos sanitarios chilenos. Caso relleno sanitario Loma Los Colorado". Tesis para optar al título de Ingeniero Constructor de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
2. 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.
3. Beaven, RP And Powrie, W., 1995, "Determination of the Hydrogeological and Geotechnical Properties of Refuse using a Large Scale Compression Cell". Proceedings of the 5th Sardinia International Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
4. Bleiker, DE, Farquhar, G. and Mcbean, E., 1995, "Landfill settlement and the impact on site capacity and refuse hydraulic conductivity". 5th International Sardinia Landfill Conference, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
5. Cartier, G. y Baldit, R., 1983, "Comportement Géotechnique des Décharges de Residus Urbains"; Bull. Liaison, Lab. Central des Ponts et Chaussées, 128, Nov-Dec, pp. 55-64.
6. Charles, J.A., 1984, "Settlement of Fills", Ground Movements and their Effects on Structures, Ed. by P.B. Attewell and R.K. Taylor. Surrey Univ. Press, New York, pp.25-45.
7. Dvirnoff, A.H., y Munion, D.W., 1986, "Stability Failure of a Sanitary Landfill". International Symposium on Environmental Geotechnology, H.Y. Fang, Editor.
8. Espinace, R., Díaz, I., Palma, J.H., Szanto, M., 1992, "Experiencias en Chile del relleno sanitario como suelo de fundación". Proc.V Congreso Iberoamericano Residuos Sólidos, Madrid, pp 1-11.
9. Espinace, R. Palma J. 1990, "Problemas Geotécnicos de los Rellenos Sanitarios"; Revista Ingeniería Civil del CEDEX, N°77, Ed. Octubre, Noviembre y Diciembre de 1990, Madrid, España.
10. Fasset, J.B., Leonards, G.A., y Repetto, P.C., 1994, "Geotechnical Properties of Municipal Solid Wastes and Their Use in Lanfill Design"; Proceedings, WasteTech '94 -Landfill Technology Conference, Charleston SC, National Solid Waste Management Association, 31 pags.

11. Gourc, J.P., Olivier, F., Thomas, S., Chatelet, L., Denecheau, P. y Munoz. M.L., 2001, "Monitoring of Waste Settlements on Five Landfills: Comparison of the Efficiency of Different Devices"; Sardinia 2001, Italy.
12. Hinkle, R. D., 1990, "Landfill Site Reclaimed for commercial use as container storage facility" *Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice* ASTM STP 1070: 331-345.
13. Howland, J.D., y Landva, A.O., 1992, "Stability Analysis of a Municipal Solid Waste Landfill"; *Proceedings, Stability and Performance of Slope and Embankments - II, Vol. 2, GSP N° 31, ASCE, New York, NY.*
14. Jessberger, H.L. y Kockel, R., 1991, "Mechanical Properties of Waste Materials"; *Proc. of XV Conferenza Geotecnica di Torino, Vol. 15.08, Torino.*
15. Jessberger, H.L., y Kockel, R., 1993, "Determination and Assessment of the Mechanical Properties of Waste Material". *Proc. Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium. Sardinia, Italia, pp 1383-1392.*
16. Kavazanjian, E. J., Matasovic, N., Bonaparte, R., and Schmertmann, G.R., 1995, "Evaluation of MSW properties for seismic analysis." *Geoenvironment 2000, ASCE Geotechnical Publication No. 46 2.*
17. Keller H., A., 2005, "Análisis del modelo Meruelo". Tesis para optar al título de Ingeniero Constructor de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
18. Kolsch, F., 1995, "Material Values for Some Mechanical Properties of Domestic Waste"; Sardinia 1995, Italy.
19. Kolsch, F., 1997, "Waste Mechanics and Landfill Geotechnique"; TU Braunschweig, Germany.
20. 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.*
21. McEntee, J., 1991, "Site Investigation". *Recycling derelict land, edited by George Fleming, Institution of Civil Engineers, London. pp. 64-87.*
22. Mitchell, R.A., and Mitchell, J.K., 1992, "Stability Evaluation of Waste Landfills". *Stability and Performance of Slope and Embankments - II ASCE Geotechnical Special Publication N° 31.*
23. Oakley, R.E., 1990, "Use of the cone penetrometer to calculate the settlement of a chemically stabilized landfill". *Geotechnics of Waste fills - Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, editors, ASTM, Philadelphia, pp. 345-357.*
24. Palma, J.H., 1995, "Comportamiento Geotécnico de Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos"; Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, U. de Cantabria, Santander, España.
25. Qian, X., Koerner, R.M. and Gary, D.H., 2002, "Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction", Prentice Hall.
26. Reinhart, Debra R., Chopra Manoj B., Vajirkar Mrutyunjay M., Townsend Timothy G., 2005, "Design and Operational Issues Related to the Co-Disposal of Sludges and Biosolids in Class I Landfills – Phase II". *Civil and Environmental Engineering Department University of Central Florida, Orlando, Florida Department of Environmental Engineering and Science University of Florida. State University System of Florida Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management, University of Florida, Agosto, Florida, U.S.A.*
27. Richardson y Reynolds, 1991, "Geosynthetic Considerations in a landfill on Compressible Clays". *Proceedings of Geosynthetics '91, Vol. 2, Atlanta, GA.*
28. Shafer, A. L., Hargrove, J.Q and Harris, J.M., 2003, "Stability Analysis for Bioreactor Landfill Operations"
29. Siegel, R.A. et al., "Slope Stability Investigations at a Landfill in Southern California"; *Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, editors, ASTM, Philadelphia, pp.259-284.*
30. Sing, S. y Murphy, B., 1990, "Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills"; *Geotechnics of Waste fills - Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, editors, ASTM, Philadelphia, pp. 240-258.*
31. Souza, O., y Rodríguez, M., 1980, "Aterro Sanitário Aspectos estruturais e ambientais". *Boletín de la Asociación Brasileña de limpieza pública, pp 7-94.*
32. Sowers, G.F., 1968, "Foundation Problems in Sanitary Landfills"; *Journal of the sanitary division, ASCE, vol. 94, N° SA1, pp. 103-116.*

33. Sowers, G.F., 1973, "Settlement of Waste Disposal Fills"; 8a Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineerings, vol. 2, pp. 207-210. Moscú.
34. Terzaghi K., and Peck R.B., 1967, "Soil mechanics in engineering practice", 2 nd edn. New York: Wiley.