

ASPECTOS GEOTECNICOS DE LA CO DISPOSICIÓN DE LODOS Y RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Espinace A. Raúl ⁽¹⁾

Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid, 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 u mineros. También es consultor de diferentes empresas de manejo de residuos sólidos y de la minería.



Palma G. Juan H.

Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, Académico 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 – 2273754 – Fax 56 – 32 – 2273808 – e - Mail: respinac@ucv.cl

RESUMEN

Actualmente en Chile funcionan plantas de tratamiento de aguas servidas urbanas en diferentes ciudades. Específicamente en Santiago operan dos plantas, que generan grandes volúmenes de lodo. Si se consideran las proyecciones realizadas por la Super Intendencia de Servicios Sanitarios de Chile en este ámbito, el tiempo disponible para resolver eficientemente el problema de tratamiento o destino final de los lodos que se generen a nivel nacional, es reducido.

Debido al volumen creciente y su potencial contaminación por patógenos y metales pesados, la disposición de lodos presenta un desafío. Actualmente existen diferentes alternativas que se utilizan en Chile y otros países, para dar un destino final seguro a los lodos resultantes de los procesos de tratamiento de aguas residuales. Según la calidad y el volumen de los lodos obtenidos, es posible optar por tratamientos finales en base a incineración, aplicación al terreno, disposición en mono rellenos y co-disposición en rellenos sanitarios de residuos sólidos urbanos (RSU).

Los reglamentos vigentes en diferentes países de América y Europa, que regulan los procedimientos de co-disposición de lodos y RSU, en general cubren aspectos referidos a la infraestructura y equipos con los que debe contar el relleno sanitario, la humedad de los lodos al momento de disponerlos y la relación en peso entre el lodo y los residuos sólidos urbanos dispuestos en el relleno sanitario. Los aspectos referidos a la co-disposición y la estabilidad del depósito tienen una difusión muy limitada en la bibliografía técnica y en general no son considerados en la reglamentación nacional e internacional.

Considerando lo anterior y que el proyecto de reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas, actualmente en trámite de promulgación en Chile, considera como tratamiento final la co disposición de los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas en rellenos sanitarios, este artículo tiene como objetivo plantear una discusión técnica sobre los aspectos geotécnicos relacionados con esta situación.

PALABRAS CLAVE: Rellenos sanitarios, lodos, codisposición, estabilidad geotécnica.

1. INTRODUCCION

Antecedentes recopilados principalmente internacionales, indican que los lodos obtenidos de procesos de depuración de aguas residuales en ciudades de diversos tamaños y poblaciones, pueden tener diferentes características y propiedades, según la calidad de las aguas residuales, las

tecnologías de depuración de las aguas y el tratamiento de los lodos resultantes, que se aplique en cada caso.

Actualmente existen diferentes alternativas de manejo para dar un destino final seguro a los lodos resultantes de los procesos de tratamiento de aguas residuales. Según la calidad y el volumen de los lodos obtenidos, es posible optar por tratamientos finales en base a incineración, aplicación al terreno, disposición en mono rellenos y co-disposición en rellenos sanitarios de residuos sólidos urbanos. La aplicación de las alternativas tecnológicas disponibles para el tratamiento o destino final de los lodos debe ser acorde con los niveles de desarrollo y recursos disponibles en los diferentes países donde se aplique.

A nivel mundial, durante varios años, el uso benéfico mediante la aplicación al terreno ha sido el método preferido para la disposición del lodo generado en plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas. Esto debido a los nutrientes que poseen los lodos, que lo hace una excelente enmienda de suelo y por consiguiente, su uso como fertilizante en la agricultura ha sido ampliamente difundido. Sin embargo, en el último tiempo, se ha generado una inquietud creciente acerca de los impactos a la salud que se asocian a la utilización de este método de tratamiento, lo que ha hecho que la co-disposición de lodos con residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios, se presente como una adecuada alternativa para la disposición de lodos.

Los reglamentos vigentes en diferentes países de América y Europa, que regulan los procedimientos de co-disposición de lodos y residuos sólidos urbanos, en general cubren aspectos referidos a la infraestructura y equipos con los que debe contar el relleno sanitario, la humedad de los lodos al momento de disponerlos y la relación en peso entre el lodo y los RSU dispuestos en el relleno sanitario. Estas regulaciones y el Proyecto de Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas, actualmente en trámite de promulgación en Chile, proponen para los lodos no peligrosos, normas de aplicación general como no presentar un contenido de humedad superior al 70% y que la cantidad de lodos dispuestos diariamente no supere al 6% del total de los residuos dispuestos a diario, pudiendo autorizarse, en condiciones técnicas justificadas, hasta un 8%.

Para el caso de la co-disposición de lodos de estaciones de depuración y RSU, tanto los lodos que deben cumplir con exigencias de peligrosidad, como el relleno sanitario, con sus instalaciones y equipos, deben cumplir con requerimientos técnicos que permitan establecer una operación de disposición segura para el ambiente, la salud y la estabilidad del relleno. Esta situación se debe principalmente a que las características que presentan los lodos influyen en aspectos como generación de biogás, lixiviado y olores, así como en la estabilidad del relleno.

De acuerdo a la bibliografía técnica, la generación de biogás en rellenos sanitarios en los cuales se co-dispone lodos y RSU, se adelanta en comparación a un relleno sanitario sin lodos. Con respecto a los líquidos lixiviados, en general se puede decir que mejora, ya que se ha observado que disminuye el contenido de metales pesados. En el caso del olor, este será diferente dependiendo del tipo de tratamiento aplicado al lodo, el que deberá ser controlado al momento de realizarse la disposición, evitando molestias a los operarios y poblaciones vecinas.

Con respecto a la estabilidad, desde un punto de vista geotécnico, es fundamental que la disposición de lodos conjuntamente con residuos sólidos urbanos no produzca zonas menos resistentes que puedan inducir planos de falla o asentamientos del tipo colapso.

2. ASPECTOS GEOTECNICOS DE LA CO-DISPOSICION

Las propiedades físicas de los lodos son importantes para la disposición en rellenos sanitarios. Los problemas geotécnicos de la disposición de lodos pueden ser descritos en términos de estabilidad mecánica y capacidad portante del relleno sanitario. Los problemas de la disposición de lodos incluyen las propiedades físicas, las propiedades adhesivas sobre las instalaciones de transporte y los efectos en las propiedades mecánicas del relleno (Van der Berg et al, 1989).

Según las tecnologías que se utilicen para el tratamiento de aguas residuales, es posible distinguir diferentes tipos de lodos, con diferentes características y propiedades. Por otra parte, las características de tratamiento y disposición de los lodos tales como, nivel de estabilización, espesor

de capa, mezclas o no con otros suelos, humedad contenida, entre otros, influye en la resistencia al corte y la estabilidad.

Los aspectos referidos a la co-disposición y la estabilidad mecánica del depósito tienen una difusión muy limitada en la bibliografía técnica y en general, no son considerados en la reglamentación nacional e internacional revisada.

2.1. FACTORES QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE TALUDES

De acuerdo con Shafer et al. (2003) y Qian et al. (2002), los factores que afectan la estabilidad de los taludes, incluyen geometría, resistencia al corte de los materiales, condiciones de carga, presión intersticial, asentamientos y método de operación.

La geometría del relleno sanitario tiene un profundo efecto en la estabilidad de los taludes. La inclinación del talud, pendiente del fondo, altura del relleno y sobrecargas que inducen fuerzas, se deben incluir en el análisis de estabilidad de taludes. Por otro lado, Shafer et al. (2003) sugieren que la pendiente de los sellos de fondo, la pendiente final de los residuos y las pendientes de los sellos laterales deben ser mantenidas o diseñadas tan lisas como sea práctico. Estos autores sugieren que se debe seleccionar una sección transversal crítica, para el análisis de estabilidad, por superposición de las pendientes finales o intermedias de los residuos con las pendientes finales de los sellos. Se seleccionan secciones transversales para el análisis, donde los RSU y el sello tengan las combinaciones de pendientes mayores. También se deben dar consideraciones para la localización, donde los apoyos de sellos inclinados sean los más superficiales o la terraza de apoyo es mínima.

La resistencia al corte del suelo de fundación y las interfaces entre diferentes materiales geosintéticos, suelo y residuos, también afectan la estabilidad de los rellenos sanitarios. La resistencia al corte de los materiales de fundación, soporta las roturas por carga en la base del relleno de residuos. La resistencia al corte interna de los residuos y en los taludes de suelo también juega una importante función en la estabilidad de los taludes del relleno sanitario. Una vez que se ha identificado la interface crítica del sello con el sistema de recolección de lixiviados, se puede realizar una selección de valores razonables de rozamiento de la interface. Shafer et al. (2003) recomiendan la realización de ensayos de laboratorio empleando cajas de corte de grandes dimensiones para determinar las interfaces críticas

La densidad de los residuos y cualquier carga externa aplicada, como apilamientos de suelos sobre el relleno de residuos, según Shafer et al. (2003) son factores que afectan las condiciones de carga del relleno sanitario. La expansión vertical y apilamientos sobre rellenos existentes, incrementa las cargas normales sobre los residuos existentes, los sellos y los materiales de base. La expansión vertical induce consolidación sobre los residuos existentes. Algunas actividades posteriores al cierre pueden incrementar o incluso disminuir las cargas normales sobre los materiales de relleno.

La presión intersticial con sus incrementos puede tener impactos adversos sobre la estabilidad de los rellenos. De la misma forma, disminuciones en la presión intersticial pueden estabilizar un relleno o talud. La estabilidad del relleno puede ser afectada si no se controlan adecuadamente aspectos como la co-disposición de lodos, los residuos líquidos, las aguas subterráneas, la infiltración superficial de agua y la recirculación de líquidos dentro de la masa del relleno sanitario.

Los antecedentes consultados indican que la humedad de los lodos que se co-dispongan no debe ser mayor a la de los residuos sólidos urbanos, para no afectar la estabilidad del relleno. Es claro que a una menor humedad del conjunto lodos y residuos sólidos urbanos, aumenta la estabilidad y se reduce el riesgo de generar aumentos en el nivel piezométrico del relleno sanitario.

Los asentamientos de los materiales de relleno pueden estabilizar o agregar factores de desestabilización a la masa del relleno sanitario. Los asentamientos localizados y los puntos bajos (depresiones localizadas) facilitan la infiltración del agua superficial en el relleno, con lo cual se incrementa la presión intersticial y el nivel piezométrico en la masa de residuos. Los lodos tienen altos coeficientes de consolidación y en las zonas rellenadas con altas concentraciones, tienden a causar asentamientos locales o puntos bajos.

Las operaciones en el relleno sanitario tienen un alto impacto en su estabilidad. Shafer et al. (2003) recomiendan mezclar los lodos con los RSU antes de disponerlos en el relleno o disponerlos directamente en capas de poco espesor, de forma que puedan ocupar los espacios en los residuos cuando estos sean compactados. El grado de saturación de los residuos, los sistemas de inyección de líquidos, los sistemas de inyección de aire, los sistemas de extracción de gas, la temperatura de los residuos, el nivel piezométrico en el relleno y la presión intersticial deben ser monitoreados. La bibliografía revisada no muestra un procedimiento universal para la disposición de lodos y RSU, infiriéndose que los procedimientos deben adecuarse al tipo de relleno sanitario, la infraestructura y equipos disponibles, las características del lodo y los RSU que se dispongan.

2.2. PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE LOS LODOS Y LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Entre las propiedades geotécnicas más relevantes para estudiar la estabilidad de los rellenos sanitarios, se encuentra la densidad de los RSU y la resistencia al corte de residuos sólidos y lodos. Los valores de densidad de los residuos sólidos urbanos, registrados en la literatura tienen un amplio rango debido a factores como; condiciones de humedad y compactación en el momento de disponer los residuos, presiones de sobrecarga y fuente de generación de los residuos. Landva and Clark (1990), informaron densidades que varían entre 40 a 75 libras por pie cúbico (pcf) en su estudio sobre RSU. Kavazanjian et al. (1995) dan pesos específicos entre 20 pcf y 99 pcf. Los valores bajos se pueden considerar para residuos sueltos o mal compactados. Los valores superiores se relacionan con residuos bien consolidados en zonas profundas del relleno. Para los análisis de estabilidad de RSU típicos, el peso específico total de los residuos dispuestos normalmente varía de 65 pcf a aproximadamente 70 pcf. Shafer et al. (2003), informa un peso específico total de un biorreactor de residuos de aproximadamente 80 pcf. El peso específico total más alto, generalmente es atribuido a altos contenidos de humedad y las mayores consolidaciones de los biorreactores de residuos.

Los valores de resistencia para los RSU presentan un rango amplio. La resistencia al corte y las características de rozamiento han sido obtenidas en laboratorio desde ensayos de corte directo y triaxiales multi etapas, análisis a posteriori de datos de ensayos de carga in situ y de ensayos de penetración estándar y de molinete. Singh y Murphy (1990), prepararon un resumen que destaca que las propiedades resistentes de los residuos tienen un ángulo de rozamiento interno que varía desde aproximadamente 1° con una cohesión tan grande como 2,200 psf, a un ángulo de rozamiento interno tan alto como 36° con 0 cohesión. Esos valores están de acuerdo con un estudio realizado por Kavazanjian et al (1995), donde la resistencia drenada fue estimada con valores extremos de cohesión de 500 psf y 0° de ángulo de rozamiento interno o 0 psf de cohesión y 33° de ángulo de rozamiento interno. En ensayos de corte directo de residuos, se registró una significativa consolidación durante la aplicación de la carga normal y drenaje de la presión intersticial durante el corte, obteniéndose ángulos de rozamiento interno mayores que la resistencia típica de los residuos (ej. 33°). De acuerdo con Share et al. (2003), los resultados de ensayos preliminares realizados por el Instituto de Manejo de Residuos (WMI) en el año 2000, revelaron un ángulo de rozamiento interno de 39° para esfuerzos normales bajos y 44° para esfuerzos normales altos. Shaun et al. (2001) realizaron ensayos de corte simple y corte directo utilizando cajas de corte de grandes dimensiones que tenían una longitud de 450 mm y 305 mm de ancho. El ensayo fue realizado sobre residuos preparados artificialmente, mezclando los constituyentes típicos de los residuos domésticos. Los resultados mostraron esfuerzos de rotura máximos (peak) de 127 kPa para desplazamientos horizontales de 93 mm (20,6% de deformación) y para un esfuerzo normal de 110 kPa. Gabr y Valero (1995), realizaron ensayos sobre residuos triturados con pesos específicos de 7,4 a 7,5 kN/m³ y determinaron que el ángulo de rozamiento fue de 34° y una cohesión de 16,8 kPa. Estos autores emplearon un molde de corte directo circular de 2,5 pulgadas de diámetro. Estos parámetros resistentes fueron evaluados al 20% de nivel de deformación. Eid et al. (2000), sugieren un ángulo de rozamiento interno de 35° y cohesión de 25 kPa.

Los ensayos de Wan et al. (1996) indicaron que los lodos deshidratados de aguas residuales se comportan de manera diferente que los suelos y en ciertos aspectos son comparables con turbas y suelos orgánicos. Bekker y Berg (1993) realizaron ensayos triaxiales para establecer relaciones entre el contenido de materia seca de diferentes tipos de lodo y la resistencia al corte. Esta investigación mostró que la cohesión del lodo para un contenido de materia seca de 38% es de aproximadamente 10 kN/m². Moo-Young et al. (1996) también realizaron ensayos de corte directo sobre muestras de lodo tratadas químicamente, obteniendo un ángulo de rozamiento que varía

entre 26° y 44° y una cohesión dentro del rango de 0 y 1,45 t/m². Para una humedad de 43% los autores encontraron que el ángulo de fricción varía entre 42° y 44° y para un contenido de 180% de humedad estos valores se encuentran entre 26° y 32°. Considerando estos resultados Kiyama y Aoyama (2001) realizaron ensayos triaxiales no-drenados sobre muestras de lodos mezclados con suelo, con distintos contenidos de humedad. Los resultados obtenidos indican que en rango de valores para el ángulo de rozamiento se encontraría entre 35° – 42° y una cohesión variable entre 0,9 y 0,13 t/m², para contenidos de humedad entre 59% – 100%, respectivamente.

La resistencia de los RSU varía según varios aspectos, siendo los más importantes la compactación alcanzada, el contenido de humedad y grado de saturación de los residuos. Por lo tanto, para determinar la resistencia de los RSU co-dispuestos con lodos, se deben desarrollar ensayos controlados en los residuos, donde la humedad pueda ser variada para permitir la máxima compactación de los residuos dispuestos y conocer la humedad de acondicionamiento. La preparación de residuos sintéticos en laboratorio con constituyentes de RSU triturados, es una solución práctica para ensayos controlados a residuos sólidos co-dispuestos con lodos. Los análisis de estabilidad pueden ser llevados a cabo utilizando métodos que satisfacen los equilibrios de momentos y de fuerzas.

2.3. ASPECTOS OPERATIVOS DE LA DISPOSICIÓN EN RELLENOS SANITARIOS

Los aspectos operativos del vertido de lodos en rellenos sanitarios involucran las propiedades físicas de los lodos de aguas residuales, sus propiedades adhesivas en las instalaciones de transporte y el efecto de los lodos sobre las propiedades mecánicas del lugar de vertido. Cuando los lodos son dispuestos, contienen una gran cantidad de agua, lo que afecta las condiciones mecánicas e hidrológicas del relleno sanitario. El vertido de lodos con un contenido de materia seca de 12% junto con RSU, incrementa el peso del relleno sanitario en más del doble.

Bekker y Berg (1993) aconsejan la disposición de residuos con un contenido de materia seca mínimo de 35% en peso. El lodo en muchos casos debe ser deshidratado mecánicamente después de su acondicionamiento con cal, cloruro de hierro o polímeros. La experiencia práctica de estos autores, ha demostrado que para lodos con contenidos de materia seca sobre el 35%, es posible realizar un efectivo proceso de mezclado con RSU y la relación lodo residuos no es muy crítica. Este contenido de materia seca puede ser fácilmente alcanzado con filtros prensa para lodos acondicionados con cal y cloruro de hierro y para lodos acondicionados térmicamente. Según Bekker y Berg (1993), para lodos acondicionados con polímeros y deshidratados con un filtro de banda, la relación óptima en peso de lodos y RSU es aproximadamente 1:4 (lodo:residuos sólidos). Blakely (1989) ensayó algunos reactores a escala de laboratorio y aconsejó una relación de 1:4,1 (lodo:residuos sólidos) para lodo deshidratado y una relación de 1:9,7 (lodo:residuos sólidos), para lodo líquido digerido, para reducir la DQO. Pero Bekker y Berg (1993) indican que con proporciones más grandes, el lodo puede ya no ser apropiadamente mezclado con los residuos sólidos y disminuye la capacidad portante para vehículos. En este caso, el equipo de compactación patinará y se empantará, mientras el lodo se adherirá a las ruedas, provocando una continua expansión del frente de trabajo.

Según Bekker y Berg (1993), en la práctica, el vertido de residuos se puede realizar de diferentes maneras; puede ser aplicado capa por capa y mezclarlo con posterioridad, o puede ser aplicado como un paquete premezclado en el relleno sanitario. Los resultados de diferentes métodos de disposición fueron combinados, encontrándose que el método de vertido no tiene una influencia significativa en las propiedades mecánicas de los residuos. Los autores sugieren que la estabilidad de un relleno sanitario decrece fuertemente si el lodo se dispone como una capa horizontal continua. La disposición de paquetes de lodo con basura, perpendiculares a la potencial línea de corte, mejora la estabilidad.

La reducida información sobre aspectos geotécnicos de la co-disposición de lodos y RSU, destaca la importancia que tiene para esta alternativa de disposición final, la humedad, método de disposición, compactación alcanzada, resistencia al corte, deformabilidad y estabilidad de taludes, tanto para los lodos como para la mezcla de lodos y RSU. En general, se consideran proporciones bajas de biosólidos respecto de estos residuos y no se han establecido criterios geotécnicos para la relación entre la humedad de disposición y la resistencia al corte o la estabilidad.

3. CO-DISPOSICION DE LODOS Y RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN CHILE

De acuerdo a las políticas impulsadas por el gobierno de Chile, se espera que para el año 2009 la cobertura de tratamiento promedio de las aguas residuales generadas en las ciudades, supere al 97%. Con la creciente puesta en marcha de plantas de tratamiento de aguas residuales registrada en los últimos cinco años, se ha incrementado notablemente la generación de lodos que requieren de un tratamiento final adecuado, desde un punto de vista sanitario y ambiental.

Actualmente existen diferentes alternativas de manejo para dar un destino final seguro a los lodos resultantes de los procesos de tratamiento de aguas residuales. Según la calidad y el volumen de los lodos obtenidos, es posible optar por tratamientos finales en base a incineración, aplicación al terreno, disposición en mono rellenos y co-disposición en rellenos sanitarios de RSU. El proyecto de reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas, actualmente en trámite de promulgación, considera como tratamiento final la co disposición de los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas en rellenos sanitarios.

En el presente artículo se discute sobre aspectos geotécnicos relacionados con la co-disposición de lodos y residuos sólidos urbanos, tomando como base información obtenida en rellenos sanitarios de la ciudad de Santiago, donde los autores han realizado investigaciones y consultorías técnicas. En las evaluaciones de estabilidad realizadas en rellenos sanitarios chilenos con co disposición de lodos y residuos sólidos urbanos, los autores han considerado aspectos como: las características de la zona de estudio y los antecedentes geotécnicos disponibles entre otros datos relevantes para la evaluación.

3.1. CARACTERISTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

La caracterización de la zona de estudio empleada, considera en primer lugar los aspectos técnicos del relleno sanitario por su relevancia, ya que aportan información útil para adoptar criterios y consideraciones geotécnicas al momento de evaluar las condiciones de estabilidad. Se consideran antecedentes como la procedencia y tipo de residuos depositados, capacidad global, superficie de ocupación proyectada, altura final y vida útil del relleno sanitario. Se busca contar con información ajustada sobre la configuración del relleno sanitario, las pendientes de sus diferentes taludes, la superficie ocupada, las obras auxiliares para el manejo de las aguas superficiales, las vías de circulación y el plan de crecimiento definido en el proyecto con sus diferentes etapas.

Los antecedentes relativos al diseño del sello de fondo, además del sistema de recolección y manejo de líquidos lixiviados y biogás son de especial relevancia al momento de evaluar la estabilidad. Se debe destacar que desde un punto de vista geotécnico, el funcionamiento eficiente de los sistemas de drenajes de líquidos lixiviados, así como el funcionamiento eficiente de los sistemas de drenajes de biogás, pasivos y activos, evitan la generación de sobrepresiones intersticiales en el interior del relleno por efecto del aumento del nivel piezométrico.

Para estudios de rellenos con procesos ya iniciados, se solicita información como fecha de inicio de la co disposición, procedencia y tipos de lodos dispuestos en el relleno sanitario, así como el tipo de RSU con los que se co dispone. También son relevantes los antecedentes relativos a la tecnología de depuración empleada en las plantas de tratamiento de aguas residuales, la cantidad de lodo producido y los procesos en la línea de lodos que los han generado. Es fundamental para evaluar la variación de las propiedades mecánicas del relleno, conocer la caracterización de las zonas del relleno sanitario donde se ha dispuesto exclusivamente RSU y las zonas donde se ha co dispuesto residuos sólidos y lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales. También se requieren las características del lodo, en relación a si es un producto estabilizado y no peligroso y la información relativa a la proporción de lodos y RSU depositados, así como las humedades al momento de recibir y co disponer el lodo.

Los reglamentos que regulan los procedimientos de co-disposición de lodos y RSU vigentes en diferentes países, en general cubren aspectos referidos a la infraestructura y equipos con los que debe contar el relleno sanitario, la humedad de los lodos al momento de disponerlos y la relación en peso entre el lodo y los RSU dispuestos en el relleno sanitario. Estas regulaciones y el Proyecto de Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas,

que actualmente está en trámite de promulgación en Chile, prescriben para los lodos no peligrosos, normas de aplicación general como no presentar un contenido de humedad superior al 70% y que la cantidad de lodos dispuestos diariamente no supere al 6% del total de los residuos dispuestos a diario, pudiendo autorizarse, en condiciones técnicas justificadas, hasta un 8%. Tanto los lodos que deben cumplir con exigencias de peligrosidad, como el relleno sanitario con sus instalaciones y equipos, deben cumplir con requerimientos técnicos que permitan establecer una operación de disposición segura para el ambiente, la salud y la estabilidad del relleno.

3.2. ANTECEDENTES GEOTECNICOS

La recopilación de antecedentes geotécnicos busca en primer lugar, evaluar la condición de homogeneidad del material del relleno, comprobar la situación del nivel piezométrico al momento del análisis y realizar una selección de diversos parámetros resistentes, que pueden ser contrastados con resultados obtenidos a través de experiencias internacionales, como ensayos de penetración, de carga o back análisis.

Los antecedentes que se aportan en el presente apartado han sido obtenidos desde prospecciones, estudios e investigaciones geotécnicas realizadas por los autores, que aportan información relevante sobre el comportamiento geotécnico de rellenos con co disposición de RSU y lodos provenientes de estaciones de depuración de aguas residuales. El lodo estudiado, se caracterizó geotécnicamente en base ensayos de granulometría, límites de consistencia y compactación.

Para la realización de las granulometrías el lodo fue secado a horno durante un periodo superior a las 24 horas antes de comenzar el tamizado. Para la obtención de finos se empleó el método por vía húmeda. Un resumen de las granulometrías efectuadas se presenta en la figura 1.

Mallas ASTM	% que pasa
# 4	100
# 10	51
# 40	19
# 200	11

Figura 1: Granulometría lodo

Los resultados de los ensayos de límites de consistencia realizados al lodo estudiado, se presentan en la figura 2. Estos ensayos se realizaron sobre el lodo en estado natural, sin utilizar horno para secar material y luego tamizar por malla # 40, ya que según los antecedentes bibliográficos, el límite líquido corresponde a una humedad levemente superior a la que poseía el lodo en su estado natural. Se pudo apreciar una alta capacidad de retención de humedad en los lodos en estado natural.

Las características de compactación de los suelos, se determinaron por el método Proctor Normal, los resultados se presentan en la figura 2.

	Lodos
Límite Líquido	430
Límite Plástico	89
Índice de Plasticidad	41
Densidad Máxima Compactada Húmeda (gr/cm ³)	1,4
Humedad óptima (%)	49
Densidad Máxima Compactada Seca (gr/cm ³)	1,0
95% DMCS (gr/cm ³)	0,95

Figura 2: Resumen de los resultados de límites de consistencia y ensayo Proctor Normal

Con el propósito de estimar la densidad posible de obtener en lodos incorporados al relleno sin someterlos a procesos de secado, se compactó una probeta de lodos en estado de humedad natural, cuyos resultados fueron, densidad compactada húmeda 1,3 gr/cm³; Densidad compactada seca 0,8 (gr/cm³); Humedad de compactación 72 %.

A partir de las informaciones obtenidas del relleno sanitario sobre los pesos de los residuos, lodos y material de cobertura depositados, además de los antecedentes topográficos, se realizó una estimación de la densidad alcanzada por el relleno sanitario. Los resultados obtenidos se presentan en la figura 4, donde se puede apreciar que las mayores densidades se alcanzan con la co-disposición de lodo y residuos sólidos, mientras que la menor se presentó en el periodo en que sólo se depositaron residuos sólidos. El promedio general de densidad alcanzada en el relleno sanitario es de $1,2 \text{ t/m}^3$. El periodo que se extiende entre el 31 de marzo y 29 de mayo del año 2004, la densidad promedio de lodo y residuos es de $1,4 \text{ t/m}^3$. El periodo que abarca desde el 10 de octubre de 2004 hasta 16 de junio de 2005, la densidad promedio de lodo y residuos es de $1,4 \text{ t/m}^3$. El periodo comprendido entre junio y septiembre de 2004, en el cual no se dispuso lodo en el relleno sanitario, la densidad promedio de los residuos es de $1,2 \text{ t/m}^3$.

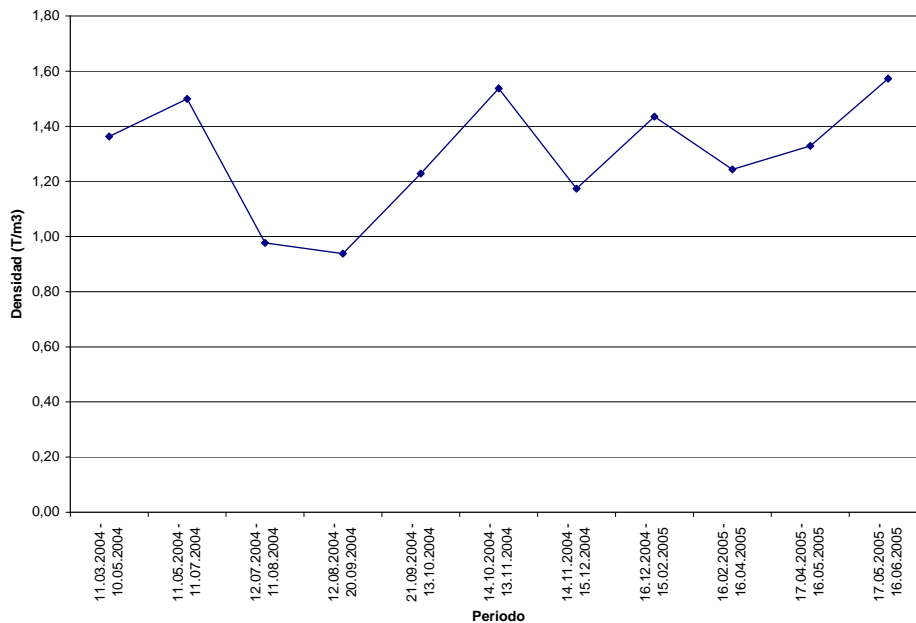


Figura 4: Densidad alcanzada en el relleno sanitario con co-disposición de lodo y residuos.

Los ensayos de penetración dinámica realizados en diferentes campañas, en taludes y coronamiento de un relleno sanitario, muestran curvas que indican que existe homogeneidad en la resistencia a la penetración con la profundidad, aumentando progresivamente y de forma lineal, ver figura 5. La información que se obtiene de estos ensayos es de gran importancia para evaluar la estabilidad tanto estática como sísmica del relleno. Los resultados obtenidos de los ensayos de penetración dinámica, permiten conocer la resistencia a la penetración (N) e indirectamente órdenes de magnitud del estado de compacidad en que se encuentran los materiales que conforman el relleno. Estos resultados contribuyeron a la estimación de la cohesión y el ángulo de roce interno de la masa del relleno. Esta información se complementa con los valores promedio de la densidad in situ del relleno.

Las tendencias de la respuesta en resistencia a la penetración de los residuos, ha sido de gran importancia al momento de deducir los parámetros geotécnicos del relleno en diferentes sectores. Se ha considerado que la resistencia a la penetración de los lodos es casi nula y que los RSU aportan la resistencia. La evaluación de la estabilidad requiere determinar los niveles piezométricos en el relleno sanitario, para los cual fue necesario instalar piezómetros en un área representativa.

3.3. DEDUCCIÓN DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

El comportamiento mecánico de los RSU en condiciones de no saturación, según el modelo propuesto por Kolsh (1993), sería similar al que presentarían los rellenos de tierra armada y estaría definido por una "matriz básica" compuesta por partículas medias a finas, cuyo comportamiento es friccional y una "matriz reforzada" asociable a una cohesión. Sin embargo, se debe considerar que las propiedades resistentes de esta estructura se ven fuertemente influenciadas por el porcentaje de materia orgánica y el nivel de saturación.

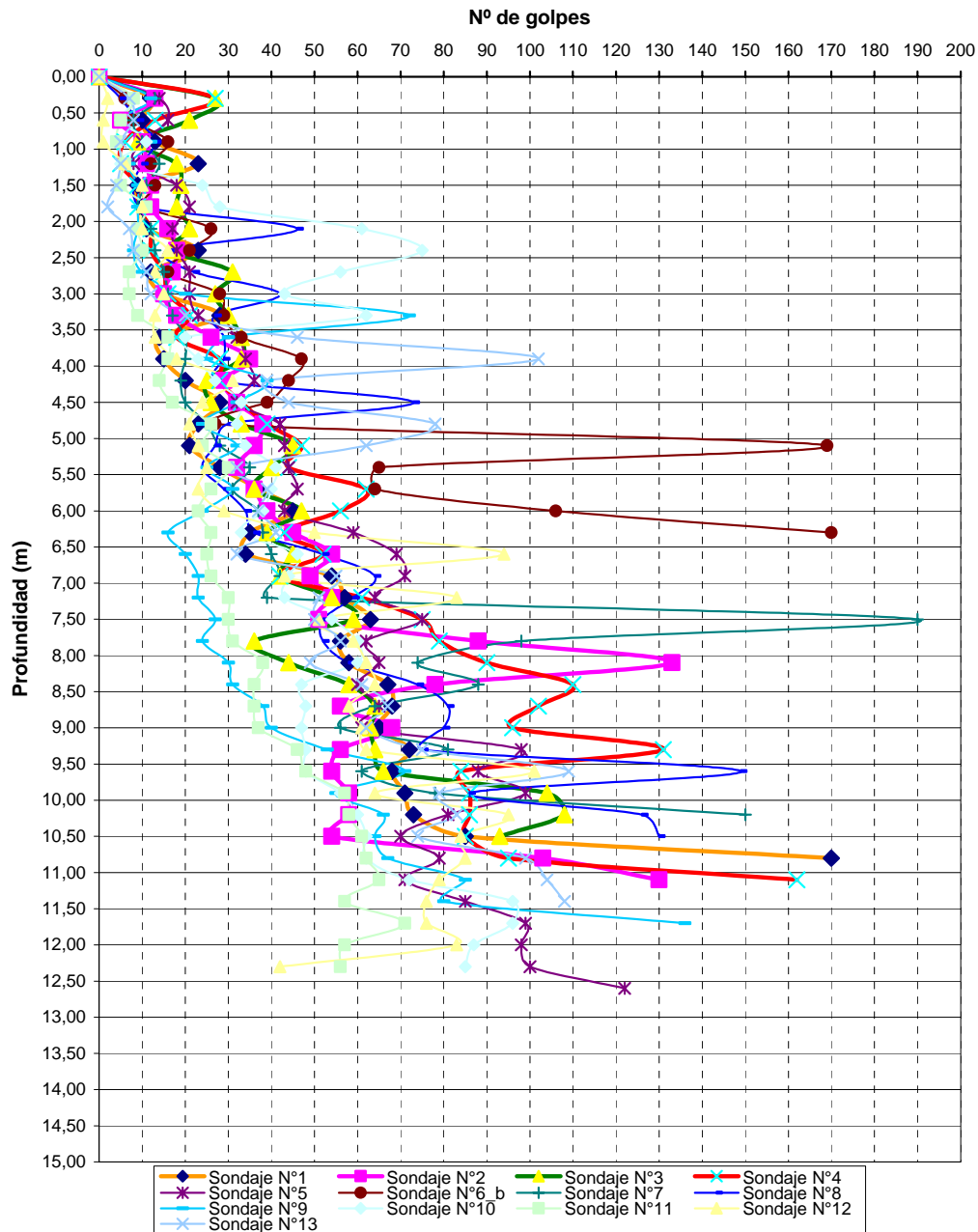


Figura 5: Resultados ensayos de penetración dinámica realizados en área con co disposición

Respecto a los lodos, recientes investigaciones y experiencias internacionales indican que éstos presentan un comportamiento mecánico comparable, en ciertos aspectos, al de un suelo orgánico y/o al de una turba. (Debra et al. 2003). Según lo anterior, una co-disposición de lodos estabilizados de manera deficiente y de RSU aumentaría significativamente el porcentaje de materia orgánica, disminuyendo los parámetros resistentes y reduciría la conductividad hidráulica del material, lo cual afectaría el drenaje de lixiviados y gases favoreciendo la generación de presiones intersticiales dentro de la masa de residuos depositados. Esto se traduciría en un comportamiento mecánico inadecuado, considerando las sollicitaciones mínimas que debería soportar este tipo de depósito durante la etapa de operación. Por lo tanto, para realizar una co-disposición es fundamental desde el punto de vista de la estabilidad mecánica una adecuada dosificación y mezcla del material.

Considerando lo anterior el comportamiento mecánico resultante sería similar al propuesto por Kolsh (1993) para los residuos sólidos, ya que las "matrices de resistencias" se mantendrían aproximadamente constantes al no alterar mayormente la estructura global del material.

Esto fue confirmado de manera cualitativa a partir de los resultados obtenidos desde los ensayos de penetración dinámica, realizados en la zona de estudio. De acuerdo a lo expuesto en el punto 3.2, de manera general los valores de resistencia a la penetración registrada en el presente estudio, presentaron una tendencia de incremento en profundidad y un rango de valores similares a los obtenidos en los ensayos realizados en otras zonas del relleno, en estudios realizados con anterioridad.

De acuerdo a los antecedentes recopilados, en el relleno sanitario hubo un período inicial en el cual se depositó un tipo de lodo, que se mezcló con los residuos en una proporción que dista de la recomendada internacionalmente. Debido a esto, existe un área del relleno en el cual es razonable esperar un incremento en la proporción de materia orgánica, una disminución de la resistencia al corte de los residuos depositados y un incremento de la humedad del relleno. Esta área se definió como primera zona de Co-disposición antigua y se consideraron parámetros resistentes más bajos. El área donde se ha depositado otro tipo de lodo y la proporción de lodos respecto de los residuos sólidos es menor, se denominó segunda zona de Co-disposición.

Para estimar los parámetros resistentes de la primera zona de Co-disposición, se realizó un retro análisis bajo una condición de equilibrio límite en condiciones estáticas, considerando la configuración geométrica del relleno y una posición del nivel piezométrico ubicado a 5 m bajo el nivel del terreno en la superficie de coronamiento del relleno, y 2 m bajo el nivel el nivel del terreno en la zona de taludes. Para validar los resultados alcanzados, los criterios adoptados por los autores fueron contrastados con parámetros resistentes propuestos para estos casos por la bibliografía especializada, figura 6.

Los parámetros resistentes del sector de la primera zona de Co-disposición, se dedujeron a partir del comportamiento mecánico estimado para este tipo de materiales, según lo propuesto por recientes investigaciones internacionales y considerando la experiencia de los autores, figura 6. Estos valores fueron validados empleando la información cualitativa obtenida desde los ensayos de penetración dinámica realizados en diferentes rellenos sanitarios.

Los parámetros resistentes de los residuos sólidos y del suelo de fundación fueron recopilados de estudios realizados con anterioridad por los autores, figura 6. Respecto a los parámetros resistentes adoptados para la interfase basal, estos corresponden a un ángulo de fricción de 25° y una cohesión nula, valores asociables para interfases compuestas cubiertas con HDPE texturado protegido con material granular de empréstito.

Material	Parámetros Geotécnicos		
	γ_t (t/m ³)	ϕ (°)	c (t/m ²)
Primera zona de co-disposición	1,2	16	3,1
Segunda zona de co-disposición	1,2	18	4,5
Suelo de fundación	2,0	40	3,0
Residuos Sólidos	1,2	18	5,0

Figura 6: Parámetros geotécnicos considerados en los análisis de estabilidad del relleno sanitario

Para el análisis sísmico, desarrollado mediante método pseudo-estático se tuvo presente el análisis del riesgo sísmico de la zona realizado para el proyecto original, en estudios anteriores. De acuerdo al criterio sísmico obtenidos de la Nch 433 of 93, el relleno está situado en la zona sísmica 2 y por lo tanto le correspondería una aceleración máxima efectiva (A_0) de 0,3 g, la cual concuerda con la obtenida del estudio antes señalado. Además según dicha norma el suelo de fundación del relleno es clasificado como tipo I.

Como es sabido, un terremoto produce una aceleración máxima que puede actuar en una porción menor que un segundo. Una vez producido el desplazamiento de la masa está es acelerada con una aceleración menor que la máxima generada por el sismo. Un coeficiente sísmico razonable en los análisis pseudo-estáticos es casi siempre menor que el correspondiente a la máxima aceleración esperada del sismo; esto implica aceptar fallas intermitentes cada vez que la aceleración sísmica sobrepase la correspondiente al coeficiente sísmico. Criterios actuales

ampliamente compartidos, utilizan coeficientes sísmicos con valores de 1/2 o 2/3 de la aceleración máxima efectiva. Teniendo en cuenta lo anterior, correspondería emplear un coeficiente de 0,15, sin embargo, siguiendo recomendaciones del Comité Técnico TC5, Subcomité SC9 de la Sociedad Internacional de Mecánicas de Suelos y criterios nacionales de análisis de riesgo sísmico, utilizados en otros estudios, se ha considerado emplear una aceleración sísmica de diseño de 0,2 g.

4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LA MASA DE RESIDUOS

La estabilidad de los taludes en los rellenos sanitarios es evaluada generalmente por procedimientos geotécnicos convencionales. La experiencia internacional plantea que los deslizamientos más comunes en vertederos en altura, presentan superficie de rotura aproximadamente circular. Los planos de rotura activos que se pueden originar en el interior de la masa de residuos del relleno, alcanzan un desplazamiento progresivo. Estos deslizamientos generan figuraciones y agrietamientos externos que pueden dejar los residuos descubiertos y facilitar la introducción de aguas superficiales que generan un incremento del desplazamiento, disminuyendo progresivamente la estabilidad. En muchos casos, se pueden producir deslizamientos causados por el peso propio, debido a que aunque el material de relleno es liviano en sí mismo, dicho peso se incrementa con el suelo de cobertura y su saturación.

Cuando el relleno de RSU es inestable, el deslizamiento ocurre en su talud, con círculos de rotura que pueden ser superficiales de pie o de talud. Por otro lado, las causas de los deslizamientos en rellenos sanitarios pueden ser originadas con la participación de otros factores adicionales como aumentos en la presión intersticial causadas por drenaje deficiente de lixiviados y gases, factor presente en este caso estudiado, o debilitamientos a lo largo de interfaces entre materiales de baja adherencia tales como sellos basales compuestos.

La estabilidad se ha estudiado mediante métodos de equilibrio límite, como el de Janbu, o Spencer aplicando programas computacionales especializados, aplicados en los perfiles que se consideran de baja estabilidad. Para los análisis se ha utilizado el modelo computacional Slope/W (Geo-Slope Internacional Ltd.). La información sobre la geometría de los taludes estudiados ha sido obtenida de planos topográficos del relleno.

Para los análisis de estabilidad realizados por los autores, se ha considerado para las situaciones estudiadas, como factores que generarían potenciales deslizamientos los aumentos en las presiones intersticiales, los parámetros resistentes de los diferentes materiales que componen el relleno y en menor medida planos de debilitamiento a lo largo de interfaces entre materiales de baja adherencia como sellos basales compuestos. El factor de seguridad adoptado corresponde a los valores propuestos por la Environmental Protection Agency (EPA) y por recientes publicaciones internacionales (Shafer et al, 2003; Qian et al, 2003), estos son los siguientes:

- Para largo plazo el factor de seguridad contra el deslizamiento debe ser mayor a 1,5.
- Durante la etapa operacional y periodos inferiores a 2 años, el factor de seguridad debe ser mayor a 1,3.
- El factor de seguridad para superficies de deslizamiento que involucren el sello basal debe ser superior a 1,4, considerando deformaciones importantes.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La experiencia nacional e internacional de la literatura técnica, muestra que el diseño, operación y seguimiento de los rellenos sanitarios son campos de la ingeniería y la ciencia relativamente nuevos y no se ha establecido en forma definitiva criterios y procedimientos que se deben seguir. El insuficiente desarrollo de la ingeniería práctica en estos aspectos exige el establecimiento de medidas preventivas durante la operación del relleno, especialmente cuando se incluyen procesos como la co disposición de lodos de estaciones de tratamiento de aguas residuales y RSU.

El marco de referencia de los análisis de estabilidad realizados se ha fijado en base a hipótesis de trabajo obtenidas de experiencias internacionales y a criterios de diseño obtenidos de la experiencia de los autores en diferentes rellenos sanitarios del país.

Respecto a la co disposición de lodos de estaciones de tratamiento de aguas residuales y RSU, los antecedentes preliminares han sido recopilados en la bibliografía técnica; la normativa actual; además de la información obtenida en rellenos sanitarios en operación en Chile. La metodología empleada, es similar a la utilizada con resultados satisfactorios en diferentes partes del mundo.

Según experiencias internacionales, esta alternativa es considerada una buena solución de tratamiento final para los lodos que se generan en plantas de tratamiento de aguas residuales, sobretodo dado que en los próximos años se incrementará el volumen de lodos producidos, debido a las políticas ambientales impulsadas en Chile. Se ha podido observar en la revisión bibliográfica la importancia que, experiencias internacionales de disposición similares, le dan a los aspectos de estabilidad de los rellenos sanitarios. Todo lo anterior, lleva a la conclusión que se requiere contar con rellenos sanitarios que posean equipos, infraestructura y capacidad técnica para co-disponer de manera que se asegure la estabilidad del relleno, el ambiente y la salud de las personas.

Los resultados de los análisis realizados demuestran que la estabilidad de los rellenos sanitarios, presenta una directa relación con el nivel piezométrico, la geometría y los parámetros resistentes.

Se desprende, de los análisis realizados en rellenos sanitarios chilenos, que uno de los motivos principales de la baja estabilidad en condiciones estáticas y sísmicas, se debe a aspectos de la operación y construcción relacionados con la altura y pendiente excesivas de los taludes, además de otros factores que pueden causar las excesivas "presiones de poros" como: la acumulación excesiva de lixiviados; afecciones producida al sistema de extracción de gases, por la saturación de líquidos dentro del relleno y las chimeneas de drenaje de biogás, que influye en la acumulación de biogás dentro del relleno; la calidad, espesor y compactación de las capas de cobertura de los niveles inferiores del relleno, lo que contribuye significativamente a la reducción de la capacidad de drenaje de los lixiviados.

Entre las recomendaciones generales, que deben ser adaptadas a las condiciones locales de cada caso y complementadas con seguimientos geotécnicos de largo plazo para la auscultación de terreno, están:

- Contar con un sistema de drenaje interno de líquidos y gases, que permita reducir el nivel de las presiones intersticiales. Se recomienda, entre otros, la ejecución de trincheras, galerías de drenaje y drenes horizontales de alivio ubicados preferentemente al pie de los taludes. También en algunos casos puede ser necesario implementar un sistema de drenes verticales de alivio revestido, que se instale inicialmente sobre el coronamiento y terrazas superiores del relleno sanitario, con el propósito de utilizarlos para drenar líquido lixiviado.
- La tasa de drenaje de líquidos se debe realizar con un control de mediciones topográficas de los asientos que se produzcan y piezométricas de la variación del nivel freático.
- Se debe procurar mantener capas de cobertura diaria, que no sobrepasen 15 a 30 cm de espesor, procurando utilizar materiales de permeabilidad alta.
- Es fundamental contar con medidas de control y seguimiento. Entre estas medidas se destacan: seguimiento de los piezómetros implementados conjuntamente con el crecimiento del relleno sanitario; continuidad en la generación de datos aportados por las redes topográficas que se implementen para controlar los movimientos horizontales y verticales; 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 que permitan establecer las modificaciones necesarias en el sistema de alivio; medición, distanciadas en el tiempo, de las características esfuerzo deformacionales de los residuos depositados en base a ensayos de carga o de penetración, entre otras medidas de información geotécnica del relleno sanitario. Es muy importante el monitoreo en el corto, mediano y largo plazo del comportamiento del relleno sanitario, para evaluar las hipótesis planteadas, además de su estabilidad.

Los lodos, además de contribuir a aumentar el nivel de saturación del relleno, poseen una baja resistencia mecánica y aumentan la densidad del relleno. Por ello se debe poner especial atención en la relación lodo:residuos sólidos depositados y en los procedimientos de mezclado que se

implementen con el propósito de no generar zonas de mayor debilidad en el interior del relleno. Estas zonas, ante presencia de sobrecargas o sismos podrían fallar o producir asentamientos importantes del tipo colapso. El aumento excesivo de las presiones intersticiales, unido a la co disposición de lodos en proporciones excesivas, la sobrecarga existente por la basura dispuesta en las zonas altas del relleno y las cargas vibratorias producto de la maquinaria de operación, generan la elevación de los niveles piezométricos y zonas de inestabilidad mecánica de la masa de residuos.

Otros aspectos de la operación y construcción del relleno sanitario, que pueden causar excesivas "presiones de poros" y debilitar su estabilidad son: la aplicación de lodos en proporciones "efectivas", que sobrepasan las recomendaciones internacionales; una inadecuada mezcla del lodo con los residuos depositados; la afección producida al sistema de extracción de gases por la saturación de líquidos dentro del relleno y las chimeneas; y la presencia de excesivas cargas dinámicas en zonas de debilidad estructural.

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. Arheimer, B., Olsson, J., (2004). "Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)". SE-601 76 Norrköping, Sweden.
3. Azo, H., Kiyama, S., Aoyama, S., (2001). "Geotechnical properties and hydraulic conductivity of compacted water plant sludge". Presentando en Eighth International Waste Management and Landfill Symposium: Siting, aftercare and remediation of landfills. Sardinia, Italia.
4. CONAMA, (2000). "Reglamento para el manejo de lodos no peligrosos generados por plantas de tratamientos de aguas". Reglamento en trámite de promulgación. Chile.
5. Environmental Protection Agency (1993). "Use or disposal of sewage sludge biosolids, Guide to Part 503 rule". Estados Unidos.
6. Environmental Protection Agency Municipal and Industrial Solid Waste Division Office of Solid Waste, (1999). "Biosolids Generation, Use, and Disposal in the United States U.S.". September, Estados Unidos.
7. Environmental Protection Agency, (2004). "Use of Geosynthetic Materials in Base Liner Systems for Domestic, Commercial and Industrial Solid Waste Landfills". Agosto, Estados Unidos.
8. Fortuna Oliveira, D., (2002). "Estabilidad de Taludes de Macizos de Residuos Sólidos Urbanos". Facultad de Tecnología. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de Brasilia. Julio, Brasilia, Brasil.
9. Grupo de Geotecnia, (2003). "Estudio Geotécnico Relleno Sanitario Loma Los Colorados". Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Enero, Chile.
10. Isenberg, R.H., (2003). "Landfill & Waste Geotechnical Stability". USEPA Bioreactor. Workshop. 27 de Febrero.
11. Rahim, R.A., Watson-Craik, I.A., (1997). "The co-disposal of a modal bewery wastewater with domestic refuse". Departament of bioscience and biotechnology, University of Strathclyde Glasgow. UK.
12. Röhrs, LH., Fourie, AB., Blight, GE., (1998). "Effects of sewage sludge and refuse composition on the rate of degradation and leachate quality of co-disposed waste in a water-deficient environment". Department of Civil Engineering, University of the Witwatersrand. South Africa.
13. Schröder, H., Rüstmann, M., (2001). "Mono landfill for sewage sludge". Presentado en Eighth International Waste Management and Landfill Symposium: Siting, aftercare and remediation of landfills. Sardinia, Italia.
14. Suh, J., Rousseaux, P., (2001). "Comparison of environmental impacts of municipal wastewater sludge treatments". Presentado en Eighth International Waste Management and Landfill Symposium: Siting, aftercare and remediation of landfills. Sardinia, Italia.
15. University of Florida, (2003). "Design and Operational Issues Related to the Co-Disposal of Sludges and Biosolids in Class I Landfills". 2003. State University System of Florida Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management. Julio, Estados Unidos.