



Resistencia al corte de residuos sólidos urbanos: estado del arte

Carlos Andrés Ordóñez Ante
Manuel Roberto Villarraga Herrera

Autores

CARLOS ANDRÉS ORDÓÑEZ ANTE

Ingeniero Geólogo de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional.

Especialista en Mecánica de Suelos y Cimentaciones U. Eafit. Medellín.

Magíster en Ingeniería Área Geotecnia, Facultad de Minas. U. Nacional.

Trabajó durante 8 años en la empresa J. E. H. y Cía. Ingenieros de Suelos.

Coordinador Semillero de Investigación Gridic Línea Geotecnia de Suelos Tropicales. Politécnico Colombiano J.I.C.

Ganador del premio GERALD A. LEONARDS. Categoría Profesionales, otorgado por la Comisión de Geotecnia de la Sociedad Colombiana de Ingenieros, por el trabajo "Comportamiento Geotécnico de los rellenos sanitarios Curva de Rodas y La Pradera", presentado en la XIV Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana. Octubre 26 de 2007.

Profesor tiempo completo. Ingeniería Civil Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid Medellín Colombia.

Teléfono 319 79 00 ext 340

E-mail. caordonez@elpoli.edu.co

caosony@une.net.co

MANUEL ROBERTO VILLARRAGA HERRERA

Ingeniero Civil de la Universidad Nacional de Colombia.

Magíster en Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Trabajó como director del Departamento de Geotecnia de la Empresa Integral.

Actualmente se desempeña como Gerente General de la empresa INTEINSA. Profesor de la Universidad Nacional desde 1980 en cursos de pregrado y postgrado.

Director de tesis de pregrado y postgrado.

Conferencista nacional e internacional, autor de artículos especializados.

Ingeniero consultor en diversos campos de la ingeniería, tales como estabilidad de taludes, fundaciones, dinámica de suelos, mecánica de rocas y represas.

Ganador del premio GERALD A. LEONARDS, categoría Profesionales, otorgado por la Comisión de Geotecnia de la Sociedad Colombiana de Ingenieros, por el trabajo "Comportamiento Geotécnico de los rellenos sanitarios Curva de Rodas y La Pradera", presentado en la XIV Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana. Octubre 26 de 2007.

Teléfono: 2 68 27 36 2 68 12 84

E-mail. mrvillar@unalmed.edu.co

Resumen

Los desechos sólidos urbanos son una mezcla muy heterogénea de varios materiales con diferentes propiedades. Se presenta en este artículo una revisión bibliográfica de los parámetros de resistencia al corte que gobiernan el comportamiento geotécnico de estos materiales.

Abstract

The solid urban waste is a refuse compound of various materials with different properties. One presents in this article a bibliographical review of the parameters of resistance to the cut that they govern the behavior geotechnical of these materials.

Palabras Clave

Geotecnia Ambiental, Rellenos Sanitarios.

Key Words

Environmental Geotechnics, Sanitary Landfills.

Resistencia al corte de residuos sólidos urbanos: estado del arte

Carlos Andrés Ordóñez Ante

Manuel Roberto Villarraga Herrera

1. Introducción

El estudio de los aspectos geotécnicos de los rellenos sanitarios se suele agrupar dentro de la ciencia llamada "Geotecnia Ambiental", que es el encuentro entre la geotecnia clásica y las ciencias ambientales. Según Espinace R., (2002), las primeras referencias específicas sobre el tema se encuentran en los años setenta, con la creación de un subcomité de la ASTM, con el título de "geotechnics of waste management". El primer evento, donde se trata más profundamente el tema, es en el IX Congreso Internacional de la ISSMFE (Tokio, 1977), donde se dedicó a este una sesión especial. En el congreso siguiente, celebrado en Estocolmo en el año de 1981, el interés crece al incluir como una de las sesiones la de "Environmental Geotechnics". Este interés aumenta en los congresos posteriores.

Actualmente, los principales avances sobre rellenos sanitarios son canalizados por el Comité Técnico TC 5, denominado "Geotecnia Ambiental", de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE), el cual fue creado en el año de 1994. Durante el Tercer Congreso Internacional de Geotecnia Ambiental, realizado en 1998 en Lisboa, se presentó el estado del arte desagregado entre otros, en los siguientes temas: sistemas de monitoreo, estabilidad de residuos, rellenos sanitarios controlados, comportamiento de rellenos sanitarios bajo condiciones de carga extremas, por ejemplo terremotos. Espinace R. et al (2002).

Un relleno sanitario consiste en el enterramiento tecnificado de los residuos sólidos, mediante la colocación de los mismos en capas sucesivas, apisonadas y compactadas; la cober-

tura definitiva cumple funciones de aislamiento e impermeabilización y posterior acondicionamiento por revegetalización.

Los rellenos sanitarios se han concebido desde el punto de vista ambiental y sanitario. Solo, recientemente, a raíz de deslizamientos ocurridos en varios de ellos a nivel nacional e internacional, tales como Cincinatti, 1996; Doña Juana – Santa Fé de Bogotá, 1997; Filipinas, 2000, se ha tomado conciencia de lo importante de considerar estos depósitos como materiales geotécnicos.

Varios autores: Ferreira, G (2000); Park, H. (2002); Qian X, et al (2002); Machado, S. (2002), coinciden en afirmar que los residuos sólidos urbanos tienen propiedades muy heterogéneas y anisotrópicas, que hacen muy difícil su caracterización. Además, su comportamiento involucra aspectos como el tiempo, la temperatura, y las condiciones ambientales.

2. Composición de los residuos sólidos

La composición de los residuos sólidos en diferentes ciudades del mundo se puede observar en la tabla 1. Dicha composición está relacionada con las condiciones económicas propias de cada lugar, por lo tanto, las poblaciones con mayores recursos (EEUU, Reino Unido), generan menores contenidos de materia orgánica; mientras que las poblaciones llamadas tercermundistas (Colombia, Kenia, Brasil), generan mayor cantidad de materia orgánica. Lo anterior demuestra como la composición de los desechos sólidos varía de acuerdo con el país, su grado de desarrollo y su nivel cultural.

Relleno Sanitario	Materia Orgánica %	Papel %	Plástico - Caucho %	Textil %	Madera - Cuero %	Metal %	Vidrio %	Minerales %	Otros %
Sao Paulo (Brasil) R. S. Bandeirantes	55	2.0	19	3	4.0	2	2	10	--
Recife (Brasil) R. S. Muribeca	60	15	8	--	--	2	2	--	13
Belo Horizonte (Brasil)	64.4	13.5	6.5	--	--	2.7	2.2	--	10.7
Salvador (Brasil)	61.8	11.7	9.8	--	--	4.3	3.9	--	8.5
Bangkok (Tailandia)	44	25	--	3	7	1	1	--	19
Bogotá (Colombia) R. S. Doña Juana	49.53	13.61	20.46	3.56	3.19	3.35	4.22	1.99	--
Medellín (Colombia) R. S. Curva de Rodas	59.48	9.85	11.73	3.22	--	1.31	2.65	--	11.76
Pekín (China)	45	5	1	--	1	1	1		46
Nairobi (Kenia)	74	12	5	--	--	3	4		2
Hong Kong	15	3	--	10	7	3	10		22
New York (EEUU)	20	22	--	--	3	5	6		46
Estambul (Turquía)	61	10	3	3	6	2	1		14
Atenas (Grecia)	59	19	7	--	4	4	2		5
Cochabamba (Bolivia)	71	2	3	--	1	1	1		21
Varsovia (Polonia)	32.6	22.2	9.7	4.5	--	4.9	11.9		14.2
Italia	42.1	22.3	7.2	--	--	3.0	7.1		18.3
Reino Unido	23.4	33.9	4.2	--	--	7.1	14.4		17.0
Japón	22.2	31.1	15.5	--	--	6.4	13.8		10.6

Tabla 1. Composición de los residuos sólidos municipales para diferentes lugares del mundo (Modificado de Carvalho 1999 y Farias 2000).

3. Resistencia al corte de los residuos sólidos urbanos

La resistencia al corte o a la cizalladura de los residuos sólidos urbanos depende de la composición del material y de sus propiedades mecánicas, además del grado de descomposición de la materia orgánica y la edad del relleno. La dificultad de tomar muestras representativas e inalteradas de los materiales que conforman un relleno sanitario, hace que sea bastante complicado obtener datos cuantitativos de las propiedades de resistencia de un relleno sanitario.

Según Qian X, et al (2002), los desechos sólidos son un material particulado y su comportamiento se asemeja a los suelos en muchos aspectos. Como los suelos, la resistencia de los desechos sólidos aumenta con el incremento de la carga normal, sin embargo, debido al alto contenido orgánico y a la naturaleza fibrosa, los desechos sólidos tienden a parecerse más a una turba que a un suelo típico.

Entre los factores, que se consideran afectan las propiedades de resistencia de los desechos sólidos, se incluyen los siguientes:

- El contenido de fibras y de orgánicos presentes en los desechos.
- La edad de los desechos colocados en los rellenos.
- El modo de disposición (grado de compactación, espesor de las capas dispuestas, cantidad y tipo de cobertura).

La resistencia de los desechos sólidos es también función de la dirección del esfuerzo de corte. Ensayos de corte directo han mostrado que la resistencia al corte mínima se da paralela a los planos de disposición de los desechos.

Para estimar la resistencia de los desechos sólidos, se han usado tres técnicas: (Singh and Nurphy, 1990; Howland and Landva, 1992; citados por Qian X, et al (2002):

- Obtención de muestras en campo y ensayos de laboratorio.

- Ensayos de carga in situ.

- Análisis regresivos de falla.

En la literatura técnica, Qian X, et al (2002), se pueden encontrar muchos resultados de ensayos de laboratorio, realizados sobre muestras alteradas e inalteradas de desechos sólidos. Los ángulos de fricción, encontrados en ensayos de corte directo varían entre 24° y 41°, y los valores de cohesión reportados se encuentran entre 0 y 23 kPa.

El distrito sanitario de Los Ángeles (1984), citado por Botero (1999), simuló ensayos de muestras de desechos con varias sustituciones; estas incluían arena por piedras, cerámica por huesos, vidrios quebrados por envases de vidrio, etc. Con estos materiales fueron constituidas muestras de 6.15 cm de diámetro y 2.54 cm de espesor para ser ensayados en el equipo de corte directo. Se deduce que, por el tamaño de las muestras, estas fueron poco representativas. Los resultados de los ensayos dieron valores de $\Phi = 38^\circ$ y $c = 0$ kPa.

Cooper Engineers (1986), citado por Botero (1999), ensayó muestras de tubo shelby de desechos sólidos en pruebas triaxiales no consolidadas no drenadas, obteniendo valores de $\Phi = 0^\circ$ y $c = 38$ kPa.

Saarela (1987), citado por Botero (1999); realizó ensayos triaxiales sobre muestras de desechos sólidos del relleno sanitario de la ciudad de Helsinki, Finlandia, obteniendo valores de $\Phi = 20^\circ$ y $c = 67$ kPa.

En Finlandia, Landva et al. (1984), citado por Botero (1999); ensayaron muestras de gran tamaño (28 cm x 43 cm), en pruebas de corte directo, obteniendo valores de $\Phi = 24^\circ$ y $c = 21$ kPa. Un año más tarde, ellos reensayaron nuevamente estos mismos materiales en pruebas de corte directo y reportaron una disminución en la resistencia debido al aumento de la descomposición que han experimentado los residuos.

En la ciudad de Santa Fe de Bogotá (Colombia), a raíz del deslizamiento ocurrido el 27 de septiembre de 1997 en el relleno sanitario Doña Juana, se contrataron con la Universidad de los Andes, ensayos de campo y laboratorio. En campo se ejecutaron 14 sondeos con geopiezocono sísmico, obteniéndose datos continuos de presión de punta, fricción lateral, presión de poros y velocidad de onda de cortante; algunos sondeos excedieron los 30.0 m de profundidad. También se hicieron cuatro sondeos con ensayos de presiofímetro, obteniéndose datos de $\phi = 8.1^\circ$ y 18° y $c = 0.0$ kPa y 11 kPa. Los ensayos de laboratorio realizados fueron cuatro en consolidómetro, con un diámetro de 41.5 cm; Espinosa y González (2001).

En la ciudad de Medellín (Colombia), con el objeto de caracterizar los residuos del Relleno Sanitario Curva de Rodas, se realizó una serie de ensayos de corte directo y ensayos triaxiales consolidados no drenados, con medición de presión de poros, sobre muestras recompatadas. Los residuos se obtuvieron de un pozo de 60 m de profundidad, en el cual se tomaron muestras a diferentes profundidades, con lo cual se evaluó el efecto de la edad de los residuos, considerando que de estos los más profundos fueron dispuestos hace más de 10 años, los intermedios hace 5 años y los más superficiales corresponden a residuos depositados en el año (2001); se obtuvieron resultados de $\phi' = 17^\circ$ y 25° y $c' = 20$ kPa y 30 kPa. INTEGRAL S.A. (2001).

Los rellenos sanitarios construidos en ambientes tropicales, como el de Brasil, han sido estudiados desde hace algunos años. Fueron recolectadas muestras a través de dos perforaciones, realizadas en el relleno sanitario de Bandeirantes, localizado en las afueras de la ciudad de Sao Paulo. Alrededor de 9.000 toneladas de desechos sólidos son dispuestas diariamente en este relleno sanitario que empezó su funcio-

namiento a mediados de 1979. Hoy abarca un área de aproximadamente 100 hectáreas con profundidades de desechos que varían entre 20 m y 100 m. Las muestras de desechos usadas en las pruebas de laboratorio tenían 15 años aproximadamente y la siguiente composición física: madera 4%, papel 2%, plástico 17%, textil 3%, metal 5%, vidrio 2%, caucho 2%, piedra 10%, y masa (materia orgánica y suelo) 55%.

Se ejecutaron ensayos triaxiales drenados sobre especímenes estáticamente compactados con pesos unitarios nominales de 10, 12, y 14 kN/m³, diámetros de 150 y 200 mm y alturas de 300 y 400 mm, se usaron presiones de confinamiento de 100, 200 y 400 kPa. Las pruebas de compresión confinada se llevaron a cabo con un edómetro largo (385 mm de diámetro y 365 mm de altura). Se obtuvieron valores de cohesión entre 23 y 78 kPa y ángulos de fricción entre 15° y 28° .

Los resultados de estas investigaciones y de otras se pueden ver en la tabla 2 y se encuentran graficados en la figura 1, donde se observa que existe una gran dispersión de los datos.

Se puede observar en la figura 1 que los resultados obtenidos por A. J. González (2003), para el relleno sanitario de Doña Juana de la ciudad de Santa Fe de Bogotá (Colombia); muestran que la cohesión varía entre 0.0 y 15 kPa, mientras que el ángulo de fricción encontrado varía en un intervalo más amplio, desde 8° hasta 37° aproximadamente.

Los resultados obtenidos por Carvalho (1999), en ensayos ejecutados en muestras del relleno sanitario de Bandeirantes (Brasil), exhiben una clara dispersión tanto para la cohesión como para el ángulo de fricción; el primero varía entre 23 y 78 kPa y el segundo entre 15° y 28° .

Los demás autores muestran resultados puntuales que no permiten analizar de forma clara si se tiene o no alguna tendencia en sus resultados.

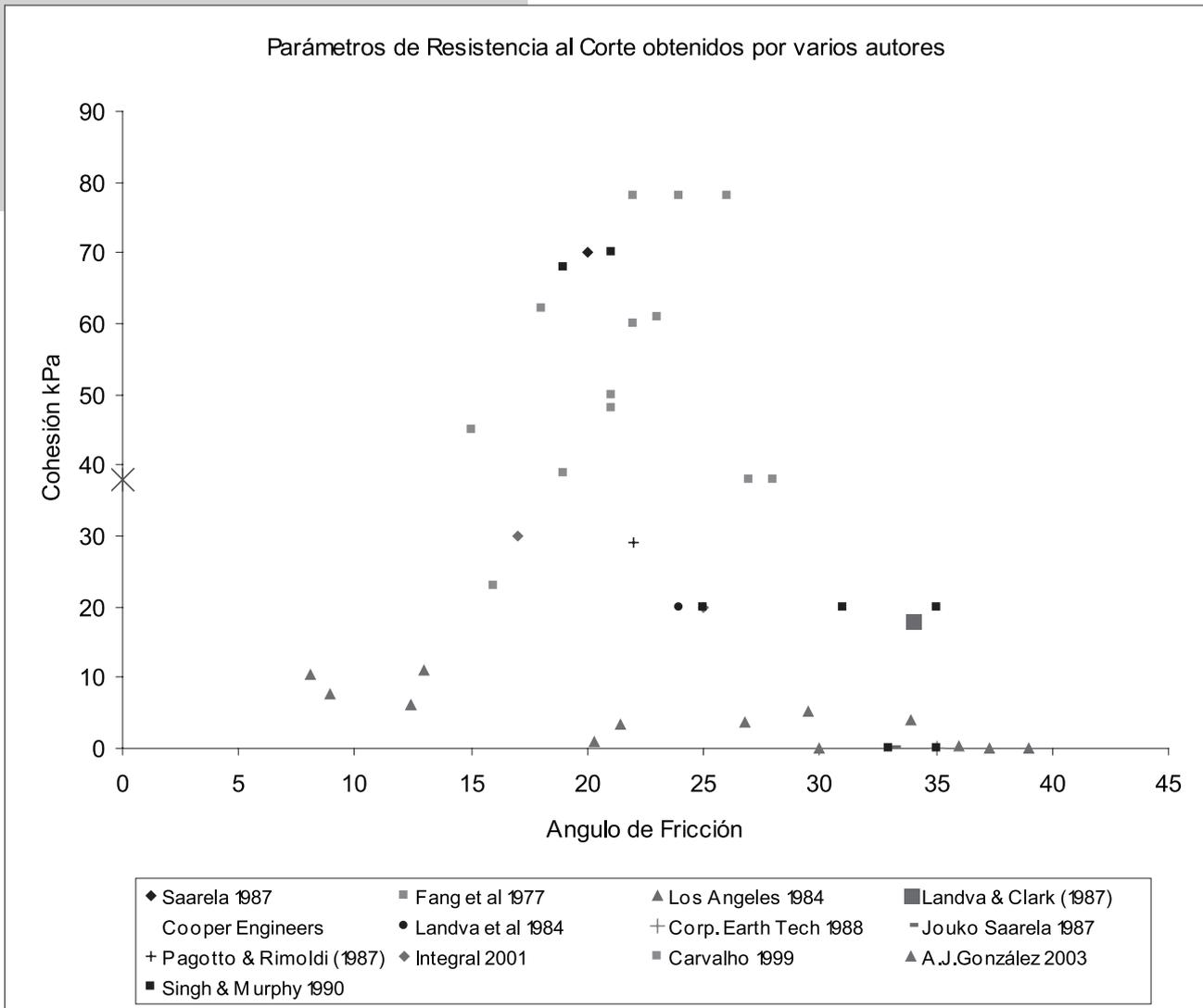


Figura 1 Parámetros de resistencia al corte obtenidos por varios investigadores en diversos lugares del mundo.

Referencia	Tipo de Ensayo	Resultado	Comentarios
Pagotto & Rimoldi (1987), citado por Quian X, et al (2002).	Análisis regresivo a partir de ensayos de carga.	$\phi = 22^\circ$ $C = 29 \text{ kPa}$	No se conocen datos sobre el tipo de desechos que trabajaron
Landva & Clark (1990), citado por Quian X, et al (2002).	Corte directo sobre desechos sólidos municipales	$\phi = 24^\circ - 39^\circ$ $C = 19 - 22 \text{ kPa}$	Esfuerzo normal superior a 480 kPa
Richardson & Reynolds (1991), citado por Quian X, et al (2002).	Corte directo	$\phi = 18^\circ \text{ a } 43^\circ$ $C = 10 \text{ kPa}$	El esfuerzo normal aplicado estuvo entre 14 y 38 kPa. Se estimó un peso unitario de los desechos de 15 Kn/m ³
González, A. J. & Espinosa, A. Soil Rock América (2003).	Piezocono	$\phi' = 8.1^\circ - 37^\circ$ $C' = 0.0 - 11 \text{ kPa}$	Ensayos realizados en perforaciones en diferentes zonas del relleno sanitario Doña Juana, Bogotá Colombia.
González, A. J. & Espinosa, A. Soil Rock América (2003).	Presiofícometro	$\phi = 13^\circ - 29.9^\circ$ $C = 4.2 - 23.3 \text{ kPa}$	Ensayos realizados en perforaciones en diferentes zonas del relleno sanitario Doña Juana, Bogotá Colombia.
Integral (2001)	Ensayos triaxiales	$\phi' = 17^\circ$ $C' = 30 \text{ kPa}$	Ensayos realizados a muestras de residuos del relleno sanitario Curva de Rodas de la ciudad de Medellín, en el laboratorio de la U. de los Andes.
Integral (2001)	Corte directo	$\phi' = 25^\circ$ $C' = 20 \text{ kPa}$	Ensayos realizados a muestras de residuos del relleno sanitario Curva de Rodas de la ciudad de Medellín, en el laboratorio de la U. de los Andes.
Carvalho (1999)		$\phi = 15^\circ - 28^\circ$ $C = 23 - 78 \text{ kPa}$	Ensayos realizados a muestras del relleno sanitario de Bandeirantes (Brasil).
Saarela (1987)	Ensayos triaxiales	$C = 70 \text{ kPa}$ $\phi = 20^\circ$	Ensayos realizados en el relleno sanitario de la ciudad de Helsinki - Finlandia.
Fang, et al (1977)		$C = 62 \text{ kPa}$ $\phi = 18^\circ$	
Dist. Sanitario Los Ángeles	Corte directo	$C = 0 \text{ kPa}$ $\phi = 39^\circ$	
Cooper Engineers (1986)	Ensayos triaxiales	$C = 38 \text{ kPa}$ $\phi = 0^\circ$	
Corp. Earth Tech (1988)	Ensayos triaxiales	$C = 0 \text{ kPa}$ $\phi = 35^\circ$	
Jouko Saarela (1987)		$C = 0 \text{ kPa}$ $\phi = 33^\circ$	

Tabla 2 Parámetros de resistencia en rellenos sanitarios, obtenidos por varios autores en diferentes lugares.

La variabilidad que se tiene en los resultados mostrados en la figura 1 y en la tabla 2, se debe a las siguientes causas:

- La forma de obtención de la muestra.
- La heterogeneidad en la composición de los desechos sólidos, además de que esta es muy variable de una región a otra.
- El tamaño de las muestras hace que estas no sean del todo representativas, especialmente para las muestras ensayadas en Los Angeles (1984), también para los ensayos ejecutados por el Cooper Engineers (1986) y por Saarela (1987); en las cuales se trabajó con muestras pequeñas tomadas en tubos shelbys.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en los diferentes rellenos sanitarios son importantes, a pesar de las limitaciones concernientes a heterogeneidad, biodegradación, condiciones ambientales, ya que estos resultados han permitido un conocimiento geotécnico de estos materiales, además de llamar la atención en lo necesario de ejecutar estudios que permitan conocer mejor el comportamiento de estos materiales.

La gran dispersión de los resultados obtenidos en la mayoría de los rellenos sanitarios estudiados, no permite asumir parámetros de cálculo para diseño, por lo tanto es necesario realizar ensayos que permitan evaluar los parámetros de resistencia al corte de cada relleno sanitario estudiado de manera puntual.

6. Bibliografía

1. BOTERO, J. E. *Comportamiento dinámico de rellenos de desechos sólidos municipales*. Tesis de Maestro en Ingeniería. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, 1999. 138 p.
2. CARVALHO, M. F. *Comportamiento mecánico de residuos sólidos urbanos*. Tesis de Doctorado. Escuela de Ingeniería de San Carlos, Universidad de Sao Paulo, 1999. 300 p.
3. ESPINOSA A. Y GONZÁLEZ A. J. (2001). *Falla del Relleno Sanitario Doña Juana* – Bogotá, Colombia. I - Las basuras acumuladas como material geotécnico. III Simposio Panamericano de Deslizamientos. Cartagena Colombia.
4. ----- . Las basuras acumuladas como material geotécnico – El caso del relleno sanitario Doña Juana – Bogotá – Colombia. III Simposio Panamericano de Deslizamientos, 2000.
5. ESPINACE A. R.; PALMA G. J.; SZANTO N. M. *La geotecnia ambiental aplicada a los vertederos sanitarios*, 2002.
6. FARIAS, A. B. Parámetros de compresibilidad de residuos sólidos urbanos. Tesis de Maestría. U.F.P.E, 2000. 86 p.
7. INTEGRAL S.A. *Relleno Sanitario Curva de Rodas, Asesoría Técnica*. Informe de estabilidad. 2001.
8. ORDOÑEZ, A. C. A. (2007) *Calibración de modelos geotécnicos para simular el comportamiento de los rellenos sanitarios Curva de Rodas y La Pradera mediante registros de instrumentación*. Tesis de Magíster en Ingeniería - Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 124 p.
9. PINEDA, M. *Manejo y Disposición de Residuos sólidos urbanos*. Acodal, Bogotá D.C., 1998.
- QUIAN, X; KOERNER, R; GRAY, D. *Geotechnical Aspects of landfill design and construction*. Prentice Hall, Inc, U.S.A., 2002.