



Shear strength of landfills

Eimar Andrés Sandoval-Vallejo ^a, Andrés Ramirez-Tascón ^b & Diego Cuarán ^c

^a Grupo G-7, Universidad del Valle, Cali, Colombia. eimar.sandoval@correounivalle.edu.co

^b Universidad del Valle, Cali, Colombia, amarata@hotmail.com

^c Universidad del Valle, Cali, Colombia, cuaran86@hotmail.com

Received: October 6th, 2014. Received in revised form: July 29th, 2015. Accepted: August 19th, 2015.

Abstract

Landfills are engineering structures formed with a specific material, whose shear strength properties can be determined in a similar way, as it is done for a geotechnical material. This paper presents results from an experimental program carried out to obtain the strength parameters for Presidente landfill at Valle del Cauca (Colombia). The experimental program included unconsolidated undrained direct shear tests (UU) performed on laboratory reconstituted samples. Variation of the internal friction angle and cohesion, as a function of the specific weight, depth and decomposition time of the landfill was evaluated. Results were also compared to international values used for design purposes. Results showed a remarkable influence of the waste decomposition time in the shear strength. Some relationship with the depth was also found. Obtained strength parameters are within international ranges recommended for design purposes.

Keywords: landfills; shear strength; direct shear; undrained tests; internal friction angle; cohesion; decomposition time.

Resistencia al esfuerzo cortante en rellenos sanitarios

Resumen

Los rellenos sanitarios son obras ingenieriles conformadas con un material específico, cuyas propiedades de resistencia al corte pueden determinarse de manera similar a la de un material geotécnico. Este artículo presenta resultados de un programa experimental realizado con el fin de obtener los parámetros de resistencia al corte del relleno sanitario Presidente en el Valle del Cauca (Colombia). El programa experimental involucró ensayos de corte directo no consolidado no drenado (UU) sobre muestras reconstituidas en laboratorio. La variación del ángulo de fricción interna y de la cohesión, como una función del peso específico, profundidad, y tiempo de descomposición del relleno fue evaluada. También se compararon los resultados con valores internacionales usados para diseño. Los resultados mostraron una marcada influencia del tiempo de descomposición en la resistencia al corte. También se encontró cierta dependencia con la profundidad. Los parámetros de resistencia obtenidos se encuentran dentro de rangos internacionales recomendados para diseño.

Palabras clave: rellenos sanitarios; resistencia al esfuerzo cortante; corte directo; ensayos no drenados; ángulo de fricción interna; cohesión; tiempo de descomposición.

1. Introducción

Los rellenos sanitarios son obras ingenieriles con un material de relleno específico, cuya caracterización física, incluida la determinación de sus propiedades de resistencia al corte, ángulo de fricción interna (Φ) y cohesión (C), puede realizarse de manera similar a la de un material geotécnico. Las propiedades de resistencia del relleno influyen en las etapas de diseño, construcción, operación, cierre y rehabilitación del mismo.

A pesar de que la estabilidad de los taludes en rellenos

sanitarios no es solamente definida por la resistencia al corte del material de relleno, y que tales diseños suelen ser conservadores, con bajas pendientes de los taludes; el uso de valores inapropiados de la resistencia al corte podría desencadenar en inestabilidades. Algunos sistemas de drenajes y tuberías dentro del relleno, también podrían verse afectados debido al uso inadecuado de valores de resistencia al corte del material.

Los lixiviados, producidos por el efecto de la lluvia sobre los componentes del relleno, aumentan la posibilidad de que se presenten inestabilidades, debido a que saturan total o

parcialmente el relleno. Aunque recientemente se han planteado métodos para la remoción de nitrógeno de los lixiviados [1], estos procedimientos son usados para la descontaminación, y no para la evacuación de los lixiviados. El uso de sistemas de drenaje puede ayudar, pero el proceso de formación de los lixiviados, mediante el contacto de la lluvia con los residuos sólidos, hace que al menos parte de la altura del relleno, se encuentre saturada en algún periodo de tiempo.

Varias inestabilidades en rellenos sanitarios han sido reportadas en la literatura. Por ejemplo, Kettleman en Estados Unidos, 1998, [2], Rumpke en Estados Unidos, 1992, [3], Doña Juana en Bogotá, Colombia, 1997, [4], Payatas en Filipinas, 2000, [5], Java en Indonesia, 2010, [6], entre otros. Debido a lo anterior, en las últimas tres décadas se ha dado importancia a la determinación de los parámetros de resistencia al corte de rellenos sanitarios, a partir de ensayos in-situ o de laboratorio, especialmente en países desarrollados. En países en desarrollo, la técnica es más reciente, y comúnmente no se determinan los parámetros de resistencia del sitio, sino que los diseñadores usan como referencia valores de otros lugares, los cuales tienen diferencias en su composición.

Este artículo busca contribuir al estado del arte en este tema, al presentar los parámetros de resistencia al corte de dos celdas de trabajo del relleno sanitario Presidente, ubicado en el municipio de San Pedro, departamento del Valle del Cauca. El programa experimental incluyó ocho ensayos de corte directo, tipo no consolidado no drenado (UU), sobre muestras reconstituidas tamizadas y compactadas en el laboratorio. Se analizan estos parámetros como una función del peso específico, la profundidad y el tiempo de descomposición. Los resultados también se comparan con valores internacionales usados para diseño, y con resultados de otro relleno en Colombia.

2. Antecedentes

2.1. Origen de los residuos sólidos

Los residuos sólidos pueden clasificarse de acuerdo a su origen, de la siguiente manera [7]:

- Domésticos
- Comerciales
- Institucionales
- Construcción y demolición
- Servicios municipales
- Zonas de planta de tratamiento industrial y agrícola

2.2. Composición física de los residuos sólidos

Debido a su composición, los residuos sólidos pueden clasificarse dentro de dos grupos principales:

- Materiales con fracción orgánica: residuos de alimentos, residuos de jardín, podas, papel, cartón, residuos sanitarios, textiles, pañales y madera.
- Materiales inertes: metales, plásticos, residuos especiales, residuos hospitalarios, vidrio, cuero, caucho, entre otros.

Los diferentes componentes individuales que constituyen

los residuos sólidos, suelen expresarse de manera porcentual [7]. La composición de los residuos sólidos varía de región a región y de país a país, por ejemplo países en desarrollo usualmente contienen residuos con mayor cantidad de material biodegradable y menos plástico; mientras que países desarrollados como Alemania, con políticas de reciclaje y pre-tratamiento bien establecidas, tienen residuos con menos contenido de material biodegradable, y una clasificación más uniforme y consistente [8].

2.3. Propiedades geotécnicas de los residuos sólidos

Los residuos sólidos son materiales heterogéneos, anisótropos y aleatorios que poseen propiedades mecánicas, biológicas e higroscópicas en continuo cambio. Están conformados por partículas sólidas y espacios vacíos que incluyen gases y lixiviados [9].

Propiedades físicas comúnmente determinadas en materiales geotécnicos, tales como peso específico, gravedad específica, contenido de humedad, distribución granulométrica, permeabilidad, resistencia al esfuerzo cortante, entre otras, pueden también ser evaluadas en los residuos sólidos.

El cambio en la estructura mecánica y biológica del material que conforma los residuos sólidos, sugiere cierta interdependencia entre sus propiedades. Por ejemplo, los parámetros de resistencia al corte pueden variar de acuerdo a modificaciones en el peso específico, la distribución de tamaños, entre otras. Debido a la composición de los rellenos sanitarios, el tiempo de descomposición biológico también puede afectar estos parámetros.

2.4. Propiedades biológicas de los residuos sólidos

Para efectos de la investigación presentada en este artículo, la propiedad biológica más importante en los residuos sólidos es la biodegradabilidad. Esta es la propiedad que tienen los componentes orgánicos para convertirse biológicamente en gases y sólidos orgánicos, e inorgánicos relativamente inertes.

La velocidad a la que los diversos componentes de los residuos sólidos pueden ser degradados varía notablemente según su composición y origen. Para fines prácticos, en función de la velocidad de descomposición, los residuos con fracción orgánica se clasifican en residuos de descomposición rápida, media y lenta, como se indica en la Tabla 1. El tiempo de descomposición de los residuos inertes es mayor de 25 años.

Tabla 1.
Velocidad de descomposición según componentes orgánicos [10]

| Velocidad de descomposición | Componente | Tiempo aproximado de descomposición en el relleno (años) |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Rápida | Residuos de alimentos residuos de jardín, poda | 0 – 1 |
| Media | Papel, cartón, cartón para alimentos, papel higiénico, residuos sanitarios | 2 |
| Lenta | Textiles, pañales, madera | 25 |

Fuente: Adaptada de Reddy et al., 2009

3. Revisión de literatura

Se realizó una revisión de literatura sobre investigaciones de resistencia al corte en rellenos sanitarios en Colombia y el mundo. Tal información se utilizó para conocer valores típicos de resistencia al esfuerzo cortante de rellenos sanitarios, para tener una idea de la composición de los rellenos en Colombia y el mundo, y para verificar si las dimensiones de la muestra y número de ensayos usados en esta investigación, son adecuados en comparación con la tendencia mundial y el estado del arte en este tema.

La Tabla 2 presenta la composición de algunos rellenos, y la Tabla 3 incluye dimensiones de las muestras, y cantidad de ensayos de corte directo realizados en investigaciones previas. Aunque existen métodos de campo, u otros ensayos de laboratorio para determinar la resistencia al corte en rellenos sanitarios, la Tabla 3 sólo presenta ensayos de corte directo en laboratorio, debido a que fue la metodología empleada en esta investigación, y a que son los más usados en laboratorio por su practicidad, y porque permiten utilizar mayores dimensiones de las muestras. Parámetros típicos de resistencia al corte son discutidos en el Capítulo 6, correspondiente al análisis de resultados.

En la Tabla 2 se evidencia una diferencia importante en el contenido de residuos orgánicos entre los rellenos de Colombia y otros lugares del mundo, específicamente en los residuos de alimentos. Los rellenos colombianos tienen en general mayor contenido de componentes orgánicos, y el relleno sanitario Presidente, objeto de este estudio, presenta el mayor porcentaje de componentes orgánicos, entre todos los rellenos comparados.

Tabla 2. Comparación de la composición para diferentes rellenos de Colombia y otros países

| Relleno | Guaymaral (11) | Villavicencio (11) | Doña Juana (9) | Colombia-Guabal (12) | Presidente (*) | Navarro (13) | Orchard-Chicago (USA) (10) | Promedio USA (7) | Brasil (14) |
|----------------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------------|----------------|--------------|----------------------------|------------------|-------------|
| <i>Compon. Orgánico</i> | | | | | | | | | |
| | Producción total % | | | | | | | | |
| Residuos Alimento | 32 | 49 | 52 | 73 | 65 | 75 | 7 | 28 | |
| Papel y cartón | 16 | 13 | 18 | 7 | 22 | 6 | 24 | 40 | |
| Madera | 6 | 3 | 3 | 1 | 0 | 2 | 12 | 2 | |
| Textiles | 5 | 2 | 4 | 1 | 3 | 1 | 8 | 2 | |
| Total orgánicos | 59 | 67 | 77 | 82 | 90 | 84 | 51 | 72 | 55 |
| <i>Compon. No Orgánico</i> | | | | | | | | | |
| | Producción total % | | | | | | | | |
| Cuero | - | - | 2 | 8 | 1 | 7 | - | 1 | |
| Plástico | 11 | 5 | 13 | 1 | 4 | 2 | 1 | 7 | |
| Metales | 7 | 7 | 2 | 1 | 2 | 1 | 5 | 9 | |
| Otros | 9 | 9 | 1 | 7 | 2 | 5 | 30 | 3 | |
| Vidrio | 14 | 12 | 5 | 1 | 1 | 1 | 4 | 8 | |
| Total no orgánicos | 41 | 33 | 23 | 18 | 10 | 16 | 49 | 28 | 45 |

* M. Arango (Comunicación personal, Agosto de 2012)

Fuente: Los autores

Tabla 3. Dimensiones de las muestras utilizadas en investigaciones previas con ensayos de corte directo [15]

| Fuente | Origen de los residuos | Diametro o lado mayor de la caja de corte (cm) | Tamaño máximo de partícula (cm) |
|----------------------------------------|------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------|
| Landva y Clark (1990) [16] | Canadá | 43 | - |
| Richardson y Reynolds (1991) [17] | Central Maine | 122 | - |
| Houston et al. (1995) [18] | Arizona | 122 | - |
| Edinciller et al. (1996) [19] | Wisconsin | 30 | 5 |
| Kavasanjian (1999) [20] | California | 46 | 10 |
| Mazzucato et al. (1999) [21] | Italia | 80 | - |
| Caicedo et al. (2002) [22] | Colombia | 90 | - |
| Mahler and De Lamare Netto (2003) [24] | Brasil | 40 | 2 |
| Zekkos (2009) [15] | California | 30 | 7.6 |
| Esta investigación | | 30 | 6.5 |

Fuente: Adaptada de Zekkos et al., 2010

En la Tabla 3 se puede observar que 30 cm de lado o diámetro, es la menor dimensión que se ha usado en investigaciones previas con ensayos de corte directo, por lo cual esta dimensión fue adoptada en esta investigación.

4. Metodología y equipo

4.1. Dispositivo de corte directo para residuos sólidos

Se construyó un dispositivo de corte para analizar muestras cuadradas de 30 cm de lado y 13 cm de altura. El dispositivo fue creado para realizar ensayos rápidos tipo no consolidado no drenado (UU), aunque se planean algunos ajustes en una segunda etapa, para realizar ensayos lentos tipo consolidado drenado (CD). El equipo permite realizar

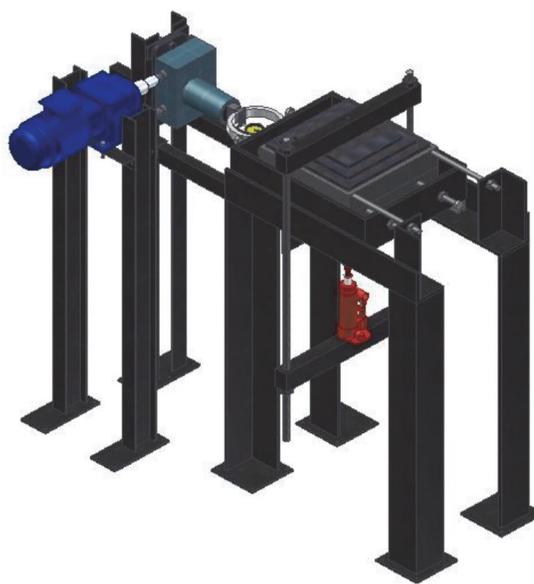


Figura 1. Esquema del dispositivo de corte diseñado
Fuente: Los autores



Figura 2. Fotografía del equipo de corte construido
Fuente: Los autores

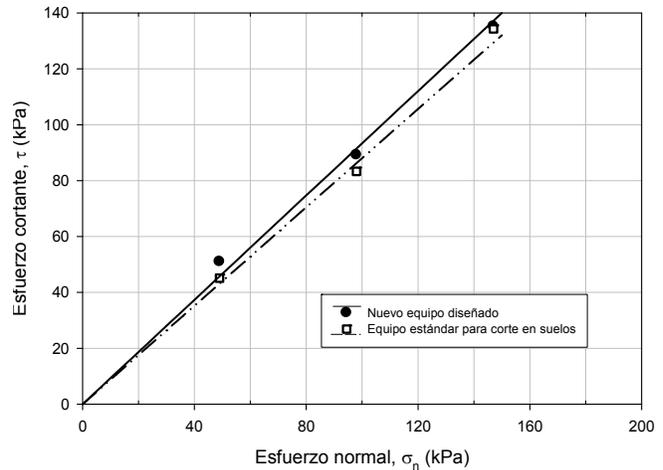


Figura 3. Envolventes de falla para validación de metodología y equipo
Fuente: Los autores

ensayos con esfuerzos normales hasta de 150 kPa. Las presiones normales son generadas por medio de una prensa hidráulica y controladas con un anillo de carga, la carga cortante es determinada mediante un anillo de carga, y los desplazamientos son controlados con el tiempo y la velocidad del motor, previamente conocida. La Fig. 1 presenta un esquema del diseño del dispositivo de corte para esta investigación, y la Fig. 2 muestra el equipo construido.

4.2. Validación de la metodología y equipo

Con el fin de verificar el correcto funcionamiento del dispositivo construido, se realizó un ensayo de corte directo tipo CD sobre una arena limpia extraída del municipio del Tambo Cauca, de acuerdo a la norma ASTM D3080-04 [24].

El ensayo fue ejecutado bajo condiciones de densidad relativa y esfuerzos normales similares en dos dispositivos: i) en un equipo de corte directo estandarizado para suelos, con muestras cuadradas de 2" de lado; ii) en la máquina de corte directo diseñada en esta investigación.

La Fig. 3 y la Tabla 4 resumen los resultados, los cuales tuvieron variaciones del orden del 2% en el parámetro de resistencia al corte obtenido (ángulo de fricción interna, Φ'). Esta diferencia es bastante aceptable para investigaciones experimentales mediante ensayos de laboratorio. Los resultados obtenidos se reportan en parámetros efectivos, debido a que las muestras se encontraban secas antes de realizar los ensayos.

5. Fase experimental

5.1. Trabajo de campo

5.1.1. Sitio de muestreo

Los resultados presentados en esta investigación corresponden a muestras extraídas en dos celdas de trabajo del relleno sanitario Presidente en el Valle del Cauca. A pesar de que las celdas en el relleno tenían profundidades de 7 y 32 m respectivamente, las muestras fueron tomadas a sólo 3 y 5

Tabla 4.

Parámetros de resistencia al corte para validación de metodología y equipo

| Prueba | ρ_d (g/cm ³) | σ_n (kPa) | τ (kPa) | Parámetros | |
|-----------------|-------------------------------|------------------|--------------|------------|------|
| | | | | Φ' | C' |
| Nuevo equipo | 1.47 | 49 | 51.0 | 42.8 | 0 |
| | 1.47 | 98 | 89.2 | | |
| | 1.47 | 147 | 135.2 | | |
| Equipo estándar | 1.47 | 49 | 45.1 | 41.9 | 0 |
| | 1.47 | 98 | 83.3 | | |
| | 1.47 | 147 | 134.3 | | |

Fuente: Los autores

m de profundidad, para evitar inestabilidades de los rellenos, debido al proceso de muestreo a cielo abierto.

El nivel promedio de lixiviados en las celdas en el momento de la toma de muestras era de 7 m, por consiguiente los residuos sólidos no se encontraban saturados, y se consideró que no había, o era despreciable, la generación de excesos de presión de poros durante la etapa de corte. Debido a lo anterior, se realizaron ensayos de corte directo tipo UU.

La celda de trabajo N° 1 contenía residuos con un tiempo de descomposición biológica de 8 meses, mientras que el tiempo de descomposición de los residuos de la celda N° 2 era de 5 años.

5.1.2. Pesos unitarios

Se determinaron los pesos unitarios en el campo por medio de calicatas. Las calicatas consisten en realizar perforaciones, en este caso de 0.50 x 0.50 x 0.50 m, a las cuales se les determina el volumen forrando la perforación con plástico muy delgado y llenándola con agua. [11]. El promedio de los pesos unitarios obtenidos fue de 6 y 13 kN/m³, para las muestras con edades de 8 y 60 meses respectivamente.

5.1.3. Toma de muestras alteradas

En cada celda de trabajo se tomaron dos muestras alteradas a 3 m de profundidad y dos a 5 m de profundidad,

para un total de ocho muestras en todo el relleno. Las muestras alteradas fueron obtenidas a cielo abierto por medio de retroexcavadora, y se depositaron en una superficie sobre plástico de alta densidad, para evitar la contaminación por la vegetación presente en las celdas de trabajo. Posteriormente, el material se tamizó en una malla de abertura de 6,5 cm, correspondiente al tamaño máximo de la muestra. Las muestras de material pasante de dicho tamiz fueron transportadas al centro de acopio de la Universidad del Valle.

5.2. Trabajo de laboratorio

5.2.1. Distribución de tamaño de las muestras

Las muestras tomadas en cada celda de trabajo se depositaron sobre un solado de limpieza, para evitar el contacto con agentes meteorológicos como lluvia o sol, al igual que la contaminación con residuos de edades y profundidades diferentes.

Para la investigación, se construyeron tres tamices con el fin de estimar a grosso modo la distribución granulométrica de las muestras. El tamiz 1, que define el tamaño máximo, tuvo una abertura equivalente a la mitad de la altura de la caja de corte directo, (6.5 cm). El tamiz 2 tuvo una abertura igual al 75% del tamaño máximo, (4.8 cm). El tamiz 3 tuvo una abertura equivalente al 50 % del tamaño máximo, (3.25 cm). La Tabla 5 y la Fig. 4 muestran la distribución de tamaño de las muestras.

Tabla 5. Distribución granulométrica de las muestras

| # | Edad (Meses) | Profundidad (m) | Rango tamaño (cm) | | |
|---|--------------|-----------------|-------------------|----------|--------|
| | | | 6.5-4.8 | 4.8-3.25 | < 3.25 |
| 1 | 8 | 3 | 17 | 40 | 43 |
| 2 | 8 | 3 | 24 | 9 | 67 |
| 3 | 8 | 5 | 64 | 13 | 23 |
| 4 | 8 | 5 | 45 | 4 | 51 |
| 5 | 60 | 3 | 3 | 19 | 78 |
| 6 | 60 | 3 | 5 | 15 | 80 |
| 7 | 60 | 5 | 36 | 19 | 45 |
| 8 | 60 | 5 | 19 | 9 | 72 |

Fuente: Los autores

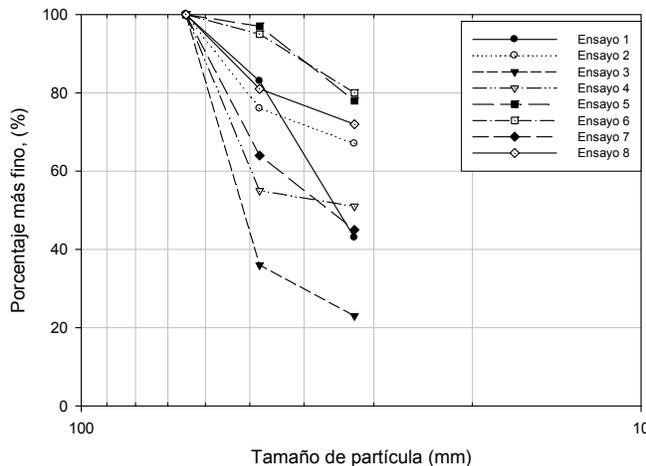


Figura 4. Distribución granulométrica de las muestras
Fuente: Los autores

Tabla 6. Características de los ensayos para las envolventes de falla

| Edad (meses) | Profundidad (m) | γ_w (kN/m ³) | Edad (meses) | Profundidad (m) | γ_w (kN/m ³) |
|--------------|-----------------|---------------------------------|--------------|-----------------|---------------------------------|
| | 3 | 8 | | 3 | 8 |
| 8 | 3 | 14 | 60 | 3 | 14 |
| | 5 | 8 | | 5 | 8 |
| | 5 | 14 | | 5 | 14 |

Fuente: Los autores

Como es de esperarse, debido a la heterogeneidad de los residuos sólidos, se encontraron diferencias considerables en la distribución granulométrica de las muestras, hasta de 61, 36 y 37% en los tres rangos de tamaño analizados. Debido a lo anterior, y siguiendo lo recomendado por [25], se prepararon las muestras para los ensayos, de tal manera que todas tuvieran la misma distribución granulométrica, la cual consistió en tres partes iguales para cada rango de tamaño.

5.2.2. Características de las muestras para los ensayos

Las características de las ocho envolventes de falla se indican en la Tabla 6. A pesar de que los pesos unitarios obtenidos (Sección 5.1.2) fueron ligeramente menores a los indicados en la Tabla 6, las muestras se compactaron a 8 y 14 kN/m³, por ser los valores mínimos recomendados por la Administradora del Relleno, para edades de las muestras de 8 y 60 meses respectivamente. Cuando se midieron en campo los pesos unitarios indicados en 5.1.2, la Administradora del Relleno compactó de nuevo el material hasta lograr los valores mínimos de peso unitario establecidos.

5.2.3. Compactación de las muestras en la caja de corte

Las muestras previamente homogeneizadas, fueron compactadas en la caja de corte en tres capas de 4.4 cm de altura cada una, usando un martillo de 7 kg de masa. No se calculó ninguna energía de compactación específica, y el martillo fue usado únicamente para distribuir el material en el molde. La Fig. 5 ilustra el molde y la muestra durante la compactación de la primera capa.



Figura 5. Compactación de la muestra antes de la etapa de corte
Fuente: Los autores

5.2.4. Procedimiento de ensayos de corte directo

Se realizaron ocho ensayos de resistencia al corte tipo UU, con el fin de obtener ocho envolventes de falla. En cada ensayo se probaron tres muestras bajo tres diferentes esfuerzos normales. Aunque inicialmente se programó utilizar para todas las muestras, esfuerzos normales de 50, 100 y 150 kPa; en el momento de aplicar los esfuerzos a las muestras con pesos específicos de 8 kN/m^3 , se generaron asentamientos diferenciales que imposibilitaron realizar los ensayos. Por esta razón, este grupo de muestras fue sometido a esfuerzos menores de 30, 70 y 110 kPa.

El criterio de falla en ensayos de corte directo en residuos sólidos, es definido cuando se presenta una reducción en el esfuerzo cortante, o cuando se alcanza un desplazamiento horizontal igual al 15% de la longitud [25]. Con base en lo anterior, el desplazamiento mínimo requerido para considerar falla de la muestra fue de 4,5 cm.

La velocidad de aplicación de la carga fue de 1,39 mm/min, y las pruebas de corte directo tipo (UU) fueron controladas por deformación. Se tomaron lecturas de carga cada 20 o 30 s, hasta finalizar la prueba. La etapa de corte fue de aproximadamente 30 minutos para todos los ensayos.

En los ensayos realizados, la falla fue presentada por exceso de deformación, y no por un pico de esfuerzo máximo, similar a lo que ocurre en suelos cohesivos normalmente consolidados o arenas sueltas.

6. Resultados y discusión

Esta sección contiene los resultados de los ensayos de resistencia al corte realizados, y el análisis de los parámetros estudiados.

Es necesario mencionar, que si previo a la etapa de corte las muestras no se encuentran saturadas, con lixiviados en este caso, los parámetros de resistencia al corte obtenidos son iguales en términos efectivos o totales, debido a que el exceso de presión de poros es igual a cero. Para ser consecuente con la literatura, y con el fundamento teórico de la mecánica de suelos, los parámetros de resistencia al corte obtenidos en esta investigación son descritos en términos efectivos (C') y (Φ'), debido a que de esta forma se presenta un comportamiento friccionante, con incremento en el esfuerzo cortante resistente cuando se aumenta el esfuerzo normal, como ocurrió durante los ensayos.

Aunque en mecánica de suelos, en parámetros efectivos la cohesión es expresada como una cohesión aparente o un intercepto de cohesión, encontrada por la dificultad de realizar ensayos de extensión para bajos esfuerzos normales, y no porque los suelos resistan esfuerzos de tensión; los residuos sólidos, debido a sus componentes, pueden presentar resistencia a la tensión con importantes magnitudes de cohesión, especialmente los residuos frescos.

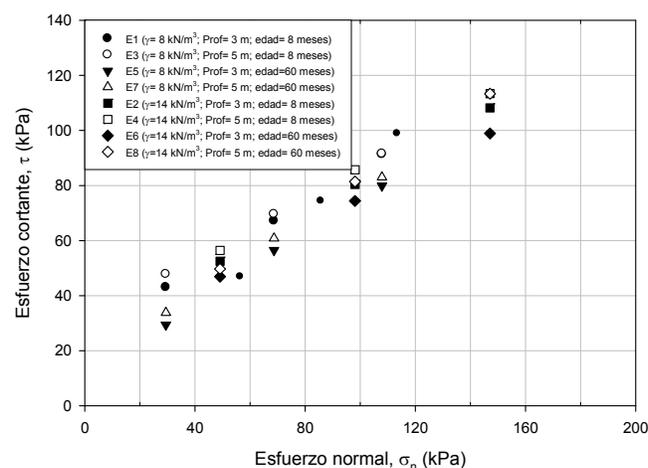
Los resultados de los ensayos se resumen en la Tabla 7 y en la Fig. 6. De manera general, se puede notar que las mayores resistencias al esfuerzo cortante, identificadas como una posición más alta de las envolventes de falla, la tuvieron muestras con 8 meses de descomposición, pesos unitarios de 14 kN/m^3 y profundidad de 5 m.

Tabla 7.

Resumen de resultados, parámetros de resistencia al corte

| Ensayo | Edad (meses) | ρ_w (kN/m^3) | Prof. (m) | C' (kPa) | Φ' ($^\circ$) |
|--------|--------------|------------------------------|-----------|------------|----------------------|
| 1 | 8 | 8 | 3 | 24.9 | 31.6 |
| 2 | 8 | 14 | 3 | 24.7 | 29.6 |
| 3 | 8 | 8 | 5 | 31.4 | 29.1 |
| 4 | 8 | 14 | 5 | 27.2 | 30.8 |
| 5 | 60 | 8 | 3 | 9.1 | 34.7 |
| 6 | 60 | 14 | 3 | 19.5 | 29.2 |
| 7 | 60 | 8 | 5 | 17.6 | 33.0 |
| 8 | 60 | 14 | 5 | 21.9 | 29.5 |

Fuente: Los autores

Figura 6. Resumen de resultados, espacio τ vs σ_n para envolventes de falla

Fuente: Los autores

A continuación se presenta el análisis de los resultados de resistencia al esfuerzo cortante de las muestras. Dicho análisis se realiza en función del peso específico, profundidad y tiempo de descomposición. Los resultados también se comparan con valores internacionales usados para diseño y con otro relleno en Colombia.

6.1. Influencia del peso específico

Se compararon ensayos de igual profundidad y tiempo de descomposición, para diferentes pesos específicos. Las comparaciones realizadas fueron para los ensayos: [1 vs 2]; [3 vs 4]; [5 vs 6] y [7 vs 8]. Las Figs. 7, 8 presentan tales comparaciones, para muestras con tiempos de descomposición de 8 y 60 meses respectivamente. En estas figuras, símbolos blancos son comparados con símbolos negros, para las mismas condiciones de profundidad y tiempo de descomposición, con diferente peso específico.

De acuerdo con los resultados presentados en las Figs. 7, 8, y los valores de la Tabla 7, no hay una tendencia marcada entre el peso específico y los parámetros de resistencia al corte. En general, los parámetros (C') y (Φ') aumentan o disminuyen según se cambien los otros parámetros de comparación.

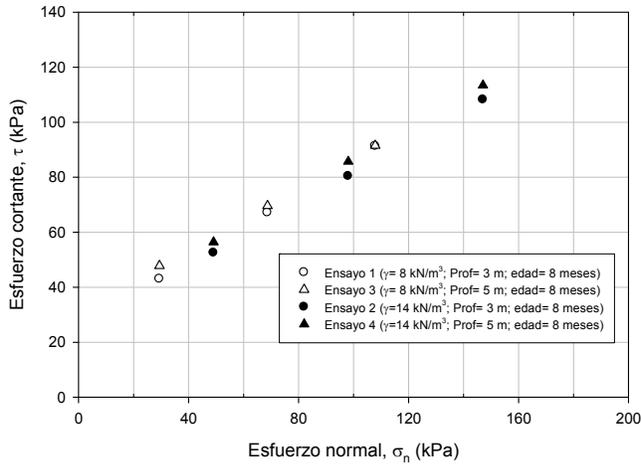


Figura 7. Influencia del peso específico en la resistencia (8 meses)
Fuente: Los autores

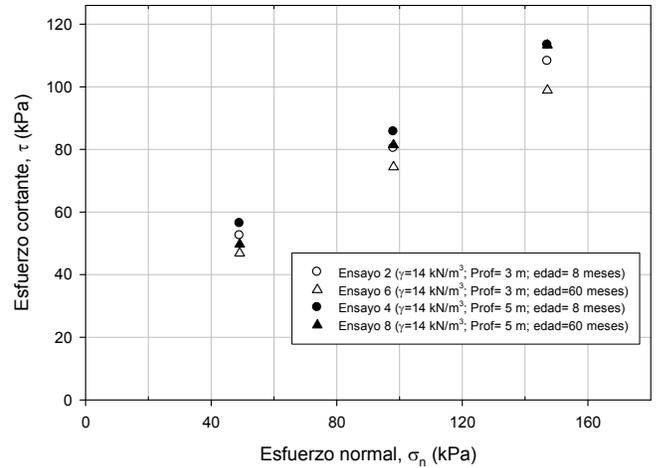


Figura 10. Influencia de la profundidad en la resistencia (14 kN/m³)
Fuente: Los autores

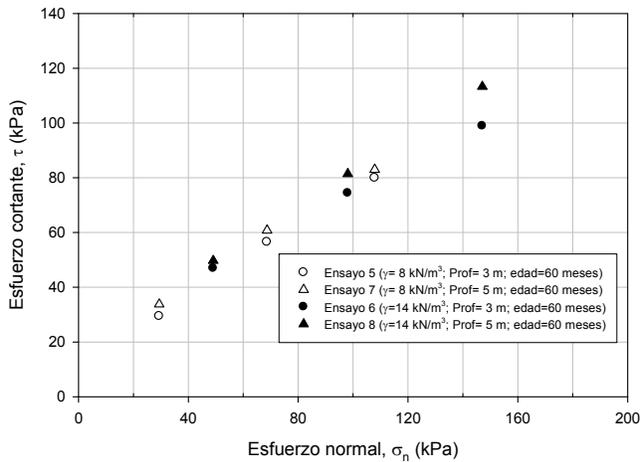


Figura 8. Influencia del peso específico en la resistencia (60 meses)
Fuente: Los autores

6.2. Influencia de la profundidad

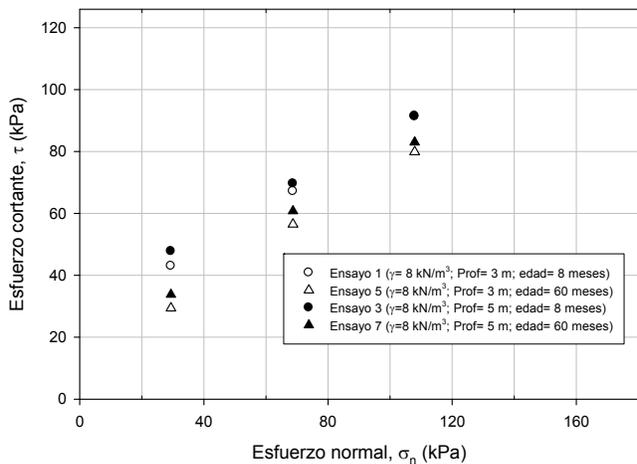


Figura 9. Influencia de la profundidad en la resistencia (8 kN/m³)
Fuente: Los autores

Se compararon los ensayos de igual tiempo de descomposición y peso específico para diferente profundidad. Las comparaciones realizadas fueron para los ensayos: [1 vs 3]; [5 vs 7]; [2 vs 4] y [6 vs 8]. Las Figs. 9, 10 presentan tales comparaciones, para pesos específicos de 8 y 14 kN/m³ respectivamente. En estas figuras, símbolos blancos son comparados con símbolos negros, para las mismas condiciones de tiempo de descomposición y peso específico, con diferente profundidad.

De acuerdo con los resultados presentados en las Figs. 9, 10, y los valores de la Tabla 7, los ensayos de mayor profundidad generaron mayor resistencia al esfuerzo cortante. Esta mayor resistencia es definida por envolventes de falla más altas, debido principalmente al mayor valor de la cohesión (C').

6.3. Influencia del tiempo de descomposición

Se compararon los ensayos de igual profundidad y peso específico para diferentes tiempos de descomposición. Las comparaciones realizadas fueron para los ensayos: [1 vs 5]; [3 vs 7]; [2 vs 6] y [4 vs 8]. Las Figs. 11, 12 presentan tales comparaciones para pesos específicos de 8 y 14 kN/m³ respectivamente. En estas figuras, símbolos blancos son comparados con símbolos negros para las mismas condiciones de profundidad y peso específico, con diferente tiempo de descomposición.

De acuerdo con los resultados presentados en las Figs. 11, 12 y en la Tabla 7, se observa una marcada influencia del tiempo de descomposición en la resistencia al corte, con valores mayores para las muestras más recientes. Las muestras con un tiempo de descomposición biológica de 8 meses presentaron en promedio mayores valores de (C'), y aunque algunos valores de (Φ') fueron menores, la posición de las envolventes de falla fue superior, comparada con la de muestras con tiempos de descomposición biológica de 60 meses, debido al notable mayor valor de la cohesión.

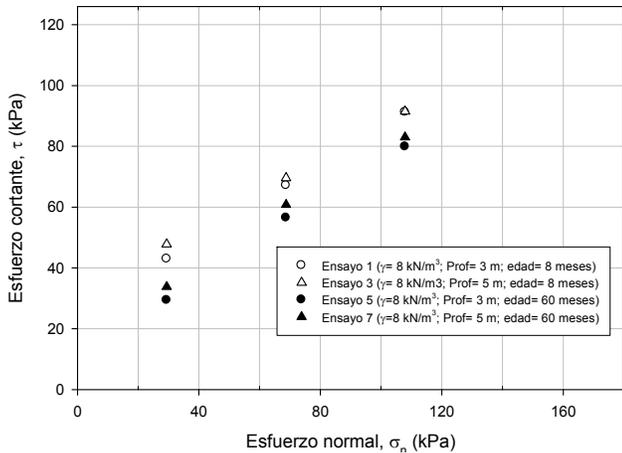


Figura 11. Influencia del tiempo de descomposición (8 kN/m³)
Fuente: Los autores

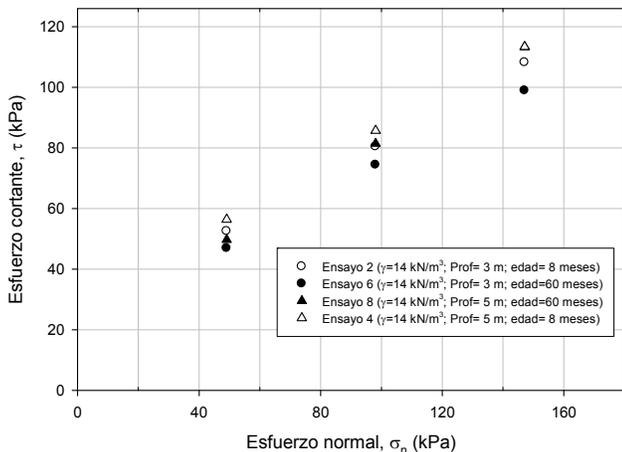


Figura 12. Influencia del tiempo de descomposición (14 kN/m³)
Fuente: Los autores

Los resultados encontrados son acordes a lo indicado por [9], quienes afirman que el comportamiento geotécnico de los residuos sólidos es inicialmente cohesivo y se transforma en friccionante, debido a procesos mecánicos y biológicos. En otras investigaciones, aunque sin encontrar una tendencia definida, se halló que en general los valores de cohesión disminuyen y los valores de fricción aumentan, para mayores tiempos de descomposición [10]. Otros autores han afirmado que muestras con alto contenido de material biodegradable, tienen también un alto valor de cohesión [22], lo cual coincide con lo encontrado en esta investigación.

6.4. Comparación de los resultados con valores internacionales [26-28]

En la revisión de literatura se encontraron tres envolventes de falla, propuestas por tres autores, para diseño de rellenos sanitarios. La Fig. 13 ilustra tales envolventes, junto con los resultados de los ensayos realizados en esta investigación. En la Fig. 13 se puede notar que en general, los valores de resistencia del relleno sanitario Presidente, se encuentran dentro de lo esperado para este tipo de materiales,

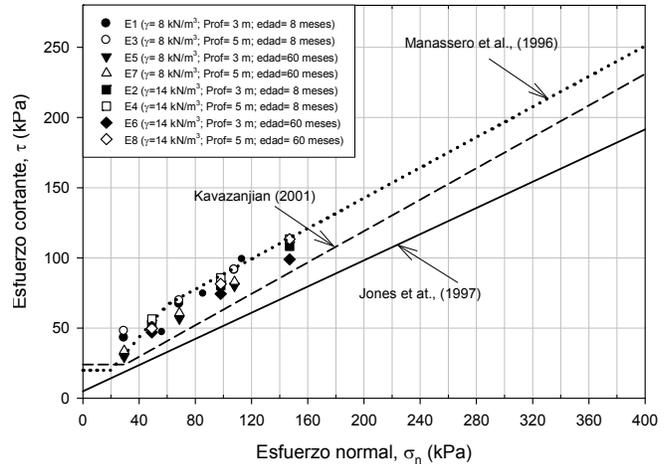


Figura 13. Comparación de resultados con envolventes de diseño internacionales
Fuente: Los autores

acercándose más hacia el límite superior [26]. No obstante, debe resaltarse que los rangos propuestos son bastante amplios, y valores cercanos a límites opuestos, tendrán importantes variaciones en su comportamiento geotécnico. También debe tenerse en cuenta que los rangos propuestos no diferencian entre tiempo de descomposición, densidades, composición, u otras características, como se mostró en las secciones anteriores, y como es reportado en la literatura (e.g., [6,9]) afectan la resistencia al corte de los rellenos.

6.5 Comparación de los resultados con otro relleno en Colombia

Las propiedades de resistencia al corte del relleno Doña Juana en Bogotá han sido reportadas [22]. La Fig. 14 compara resultados de ensayos de resistencia al corte directo del Relleno Doña Juana con resultados de resistencia al corte directo del Relleno Presidente, para muestras relativamente recientes (12 y 8 meses de descomposición respectivamente). Para propósitos de comparación, en la Fig.14 también se incluyen los valores internacionales sugeridos para diseño, discutidos en el numeral anterior. En la Fig. 14 se puede observar que las muestras del relleno Doña Juana también presentan altos valores de cohesión, incluso mayores que los del Relleno Presidente. Tales resultados pueden corroborar lo indicado en el Numeral 6.3, referente a que el alto valor de la cohesión puede estar relacionado con el contenido de material biodegradable, especialmente para muestras frescas o relativamente recientes, donde dicho material está iniciando su proceso de descomposición. Como se indicó en la Tabla 2, el relleno Dona Juana y el relleno Presidente presentan un alto contenido de material biodegradable, y ambos tuvieron importantes valores de cohesión, comparados con valores de rellenos internacionales, que en general contienen menos material orgánico.

7. Conclusiones y observaciones

En esta investigación, los parámetros de resistencia al corte del relleno Presidente en el Valle del Cauca, fueron

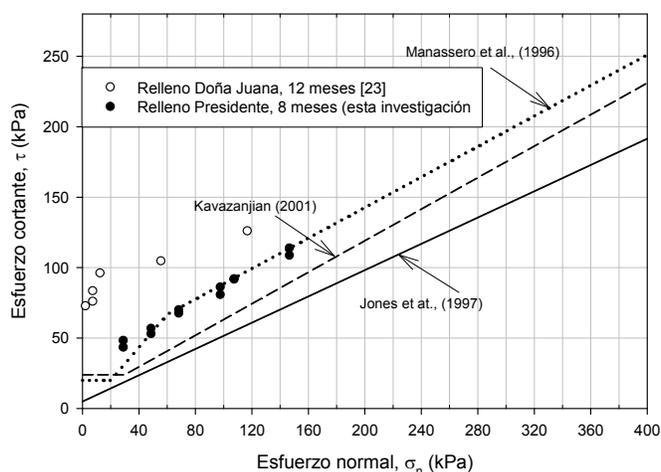


Figura 14. Comparación de resultados con otro relleno en Colombia
Fuente: Los autores

determinados. Los resultados fueron evaluados en función del peso específico, la profundidad y el tiempo de descomposición. Los parámetros de resistencia encontrados fueron comparados con valores internacionales recomendados para diseño, y con resultados experimentales obtenidos para otro relleno en Colombia.

No se encontró una dependencia significativa entre la resistencia al corte de los residuos sólidos y su peso específico.

En esta investigación se encontró que las muestras tomadas a la mayor profundidad, 5 m, generaron envolventes de falla ligeramente superiores que las muestras tomadas a 3 m. Muestras a mayor profundidad han soportado esfuerzos efectivos mayores, lo cual podría haber generado procesos en la matriz del material que incrementan la cohesión de las partículas a nivel micro. No obstante, esto no ha sido verificado y debería investigarse en detalle con ensayos más específicos, especialmente teniendo en cuenta que los ensayos fueron realizados sobre muestras reconstituidas, bajo iguales pesos unitarios.

Se encontraron marcadas dependencias entre el tiempo de descomposición de las muestras, y la resistencia al corte. Los residuos con menor tiempo de descomposición (8 meses) generaron envolventes de falla más altas, con valores mayores de (C') , a pesar de tener un ángulo de fricción interna (Φ') ligeramente inferior, en algunos casos. Lo anterior coincide con lo expuesto por otros autores [9, 10], quienes han sugerido que el comportamiento geotécnico de los residuos sólidos es inicialmente cohesivo y se transforma en friccionante, debido a procesos mecánicos y biológicos.

La alta cohesión de los residuos del relleno Presidente encontrada en esta investigación, y del relleno Doña Juana en Bogotá [22], podría ser explicada por el alto contenido de material orgánico que presentan ambos rellenos.

Las propiedades de resistencia al corte encontradas para el relleno Presidente, están dentro de los valores esperados para este tipo de materiales, acercándose al límite superior de valores internacionales propuestos para diseño. No obstante, los altos valores corresponden a residuos frescos con alta cohesión, la cual tiende a decrecer a medida que se descompone el material orgánico.

Los valores de resistencia obtenidos en la presente investigación no se deben implementar con el fin de diseñar o controlar la operación de otros rellenos sanitarios, debido a que cada relleno, incluso cada celda de trabajo dentro del relleno, requiere un estudio específico. Sin embargo, sí los componentes y tiempos de descomposición de otros rellenos son similares a los de las celdas analizadas, los datos de resistencia aquí reportados podrían servir como información preliminar para diseño.

Se sugiere realizar más investigaciones, incluyendo el efecto que tienen en la resistencia variables como el contenido de humedad, orientación de las fibras de la matriz, tipo de componentes y distribución granulométrica de los rellenos. También es recomendable usar mayores profundidades de muestreo, con el fin de incluir el efecto de la presión de poros de los lixiviados. En tal caso, debe tenerse especial cuidado en el proceso de muestreo, con el fin de evitar inestabilidades del relleno o contaminación ambiental.

Agradecimientos

Los autores de este artículo desean agradecer a la entidad administradora del relleno, Proactiva, quienes colaboraron con los permisos para el acceso, al igual que facilitaron los equipos para la toma de muestras y para la determinación de pesos unitarios en el campo. También se reconoce el apoyo económico para el uso y construcción de equipos, brindado por la Universidad del Valle mediante la Vicerrectoría de Investigaciones y el Laboratorio de Suelos y Pavimentos.

Referencias

- [1] Suárez, E. and Cardona-Gallo, S., Nitrogen removal from landfill leachate using a sequential biological passive system. DYNA, 80 (178), pp. 37-43, 2013.
- [2] Byrne, R.J., Design issues with strain-softening interfaces in landfill liners, Proceedings of Waste Technology, Session 4, Paper 4, 1994.
- [3] Eid, H.T., Stark, T.D., Evans, W.D. and Sherry, P.E., Municipal solid waste slope failure. I: Waste and foundation soil properties. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 126 (5), pp. 397-407, 2000. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:5(397)
- [4] Hendron, D.M., Fernandez, G., Prommer, P.J., Giroud, J.P. and Orozco, L.F., Investigation of 27th September 1997 slope failure at the Doña Juana landfill, Proceedings of 7th International Waste Management and Landfill Symposium, 1999. pp. 545-554.
- [5] Merry, S.M., Kavazanjian Jr., E. and Fritz, W.U., Reconnaissance of the July 10, 2000, Payatas landfill failure. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, 19, pp. 100-107, 2005. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2005)19:2(100)
- [6] Koelsch, F., Fricke, K., Mahler, C. and Damanhuri, E., Stability of landfills – The Bandung dumpsite disaster, Proceedings of 10th International Waste Management and Landfill Symposium, 2005.
- [7] Tchobanoglous, G., Gestión Integral de Residuos Sólidos. California: McGrawHill, 2003.
- [8] Dixon, N., Russel, D. and Jones, V., Engineering properties of municipal solid waste. Geotextiles and Geomembranes, 23, pp. 205-233, 2005. DOI: 10.1016/j.geotextmem.2004.11.002
- [9] Espinoza, A. y González, A., La acumulación de basura como material geotécnico II: Comportamiento de las basuras. Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes, 14, pp. 56-69, 2001.
- [10] Reddy, K.R., Gangathulasi, J., Parakalla, N., Hettiarachchi, H., Bogner, J. and Lagier, T., Compressibility and shear strength of municipal solid waste under short-term leachate recirculation

- operations. *Waste Management & Research*, 27, pp. 578-587, 2009. DOI: 10.1177/0734242X09103825
- [11] Collazos, H., *Diseño y operación de rellenos sanitarios*. Bogotá: AIDIS, 2001.
- [12] EMAPA., *Relleno sanitario Colomba-Guabal ubicado en el Valle del Cauca, informe de impacto ambiental*, Santiago de Cali, CVC, 2008, 5 P.
- [13] SCC Engineers., *Methane to marke. Informe de evaluación relleno sanitario el Navarro Cali, Colombia*, 2007, 20 P.
- [14] Lemos, S., Karimpour-Fard, M., Shariatmadari, N., Carvalho, M. and do Nascimento, J., Evaluation of the geotechnical properties of MSW in two Brazilian landfills. *Waste Management*, 30, pp. 2579-2591, 2010. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.07.019
- [15] Zekkos, D., Athanasopoulos, G.S. and Bray, J.D., Large-scale direct shear testing of municipal solid waste. *Waste Management*, 30 pp. 1544-1555, 2010. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.01.024
- [16] Landva, A. and Clark, J.I., *Geotechnics of waste fills. Theory and practice*. ASTM STP 1070, pp. 86-106, 1990.
- [17] Richardson, G. and Reynolds, D., *Geosynthetic considerations in a landfill on compressible clays*, Proceedings of Geosynthetics, 2. Industrial Fabrics Association International, 1991.
- [18] Houston, W.N., Houston, S.L., Liu, J.W., Elsayed, A. and Sanders, C.O., *In situ testing methods for dynamic properties of MSW landfills. Earthquake design and performance of solid waste landfills*. ASCE Geotechnical Special Publication, 54, pp. 73-82, 1995.
- [19] Edinçiler, A. Benson, C.H. and Edil, T.B., *Shear strength of municipal solid waste. Interim Report – Year 1*, Environmental Geotechnics Report 96-2, Madison, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin, Madison, 1996.
- [20] Kavazanjian Jr., E., *Seismic design of solid waste containment facilities*, Proceedings of the Eighth Canadian Conference on Earthquake Engineering, pp. 51-89, 1999.
- [21] Mazzucato, N., Simonini, P. and Colombo, S., *Analysis of block slide in a MSW landfill*, Proceedings of 7th International Waste Management and Landfill Symposium, pp. 537-544, 1999.
- [22] Caicedo, B., Yamin, L., Giraldo, E. and Coronado, O., *Geomechanical properties of municipal solid waste in Doña Juana sanitary landfill*, Proceedings of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics, Brazil, 1, pp. 177-182, 2002.
- [23] Mahler, C.F. and De Lamare Netto, A., *Shear resistance of mechanical biological pre-treated domestic urban waste*, Proceedings of 9th International Waste Management and Landfill Symposium, pp. 6-10, 2003.
- [24] ASTM International. *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*, Standard ASTM D 3080, 1998.
- [25] Koelsch, F., *Shear strength of waste*, Proceedings of 3rd International Workshop. Hydro-Physico-Mechanics of Landfills, pp. 10-13, 2009.
- [26] Manassero, M., Van Impe, W.F. and Bouazza, A., *Waste disposal and containment*, Proceedings of 2nd International Congress on Environmental Geotechnics, 3, pp. 193-242, 1996.
- [27] Jones, D.R.V., Taylor, D.P. and Dixon, N., *Shear strength of waste and its use in landfill stability analysis*, Proceedings of Geoenvironmental Engineering Conference. Thomas Telford, pp. 343-350, 1997.
- [28] Kavazanjian, Jr. E., *Mechanical properties of municipal solid waste*, Proceedings of 8th International Waste Management and Landfill Symposium, pp. 415-424, 2001.

E.A. Sandoval-Vallejo, es profesor asistente de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. MSc. en Ciencias en Ingeniería Civil de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, Estados Unidos; y actualmente estudiante de Doctorado en Filosofía de la Universidad de Purdue en West Lafayette, Estados Unidos. Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7) de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Principales temas de interés en investigación: comportamiento de suelos bajo cargas dinámicas, respuesta de túneles bajo cargas sísmicas, interacción suelo-estructura y resistencia al esfuerzo cortante en suelos y rellenos sanitarios.
ORCID: 0000-0003-3557-2861

A.M. Ramírez-Tascón es Ingeniero Civil de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Sus áreas de actuación se han enfocado en geotecnia y medio ambiente. Su tesis de pregrado: “Resistencia al corte en relleno sanitarios” fue desarrollada para un caso específico: El Relleno Sanitario Presidente, en el Valle del Cauca, Cali, Colombia, bajo la dirección del profesor Eimar Sandoval. Actualmente, se prepara para adelantar estudios de postgrado en ingeniería civil en los Estados Unidos.
ORCID: 0000-0002-5547-0654.

D.F. Cuarán, es Ingeniero Civil de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Su tesis de pregrado: “Resistencia al corte en relleno sanitarios” fue desarrollada para un caso específico: El Relleno Sanitario Presidente, en el Valle del Cauca, Cali, Colombia, bajo la dirección del profesor Eimar Sandoval. Desde que estaba finalizando sus estudios de pregrado y hasta la actualidad, ha trabajado para la empresa: Solarte y Cia. Ingenieros Calculistas, por esta razón acaba de iniciar estudios de postgrado en estructuras en la Universidad del Valle, Cali, Colombia.
ORCID: 0000-0001-8736-7881.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Civil

Oferta de Posgrados

Especialización en Vías y Transportes
Especialización en Estructuras
Maestría en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas de Transporte
Maestría en Ingeniería – Geotecnia
Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil

Mayor información:

E-mail: asisacac_med@unal.edu.co

Teléfono: (57-4) 425 5172