



DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS MEDIANTE ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO

Lapeña Mañero, Pablo¹; García Casuso, Carmen¹; Cañizal Berini, Jorge¹; Da Costa García, Almudena¹; Sagaseta Millán, César¹.

¹ Grupo de Geotecnia, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, Avda. de Los Castros 44. 39005 Santander (Cantabria), España, pablo.lapena@unican.es

Resumen

Aunque la reducción del volumen de residuos es un objetivo deseado, una fracción significativa se deposita en vertederos. Interesa la caracterización mecánica de estos residuos para asegurar su estabilidad y seguridad, dependientes de su resistencia, y maximizar su capacidad de almacenamiento, a través del conocimiento de su compresibilidad.

El Grupo de Geotecnia de la Universidad de Cantabria ha desarrollado estudios de la caracterización resistente de residuos sólidos urbanos (R.S.U.), para lo que se han hecho ensayos de campo y laboratorio convencionales, con diversas adaptaciones al tipo de comportamiento del material.

Las pruebas de campo se han realizado en tres vertederos, donde se han hecho ensayos de penetración estática y presiómetros. Los ensayos de laboratorio se han desarrollado en un laboratorio específico, externo a los edificios existentes, para minimizar problemas ambientales (olor y potencial contaminante de los lixiviados). Por la actual tendencia a realizar pretratamiento mecánico y biológico de los residuos (M.B.T.), dichos ensayos se han enfocado a este tipo de residuo.

Palabras clave: *resistencia, caracterización, ensayos, laboratorio, campo*

1. Introducción

El conocimiento de la resistencia de los residuos depositados en un vertedero es fundamental tanto en la etapa de proyecto como durante la explotación y el periodo post-clausura, ya que determina la inclinación que puede darse a los taludes de forma que estos sean estables, optimizando su capacidad. Por otro lado, la gran deformabilidad de los residuos hace que esta pueda no ser compatible con el resto de elementos del vertedero (sistemas de drenaje, impermeabilización, captación de gas, etc.) por lo que su conocimiento es también relevante en el diseño de los sistemas auxiliares.

En general, estas características se han determinado mediante procedimientos y equipamiento geotécnicos debido a la similitud de los vertederos con otros rellenos realizados con suelos. Pero las condiciones de los residuos sólidos urbanos (R.S.U.) son distintas de los materiales estudiados habitualmente por la mecánica de suelos, lo que obliga a hacer modificaciones en los equipos y en los procedimientos de ensayo.

2. Características mecánicas de los R.S.U.

De la revisión bibliográfica y de la experiencia propia, Lapeña (2017) resume las características generales en cuanto al comportamiento mecánico de los residuos R.S.U., siendo las principales:

- La resistencia de los residuos aumenta con la tensión octaédrica, y por lo tanto con la profundidad, lo que es un comportamiento esperable de un material friccional.
- Dada su simplicidad, normalmente se utiliza como criterio de rotura el de Mohr-Coulomb con los parámetros resistentes cohesión y ángulo de rozamiento. Sin embargo, el valor del ángulo de rozamiento disminuye con el aumento de la tensión normal, lo que proporciona envolventes de rotura no lineales. La consideración del criterio anterior da lugar a resultados no conservadores.
- Las fibras existentes en el interior de la masa de residuo aportan un refuerzo que aumenta con la deformación, proporcionando una cohesión aparente y la rigidización del material.
- Los residuos muestran una gran deformación antes de alcanzar una tensión máxima. Usualmente no es posible llegar a la rotura durante los ensayos de campo o de laboratorio. Por ello, es frecuente usar criterios de deformación admisible para la obtención de los parámetros resistentes.
- Aunque la composición de los vertederos es heterogénea, las características mecánicas de estos varían de forma previsible, lo que permite realizar los análisis considerando el material homogéneo.

En la Figura 2 se muestran propuestas de parámetros resistentes de diseño encontradas en la bibliografía.

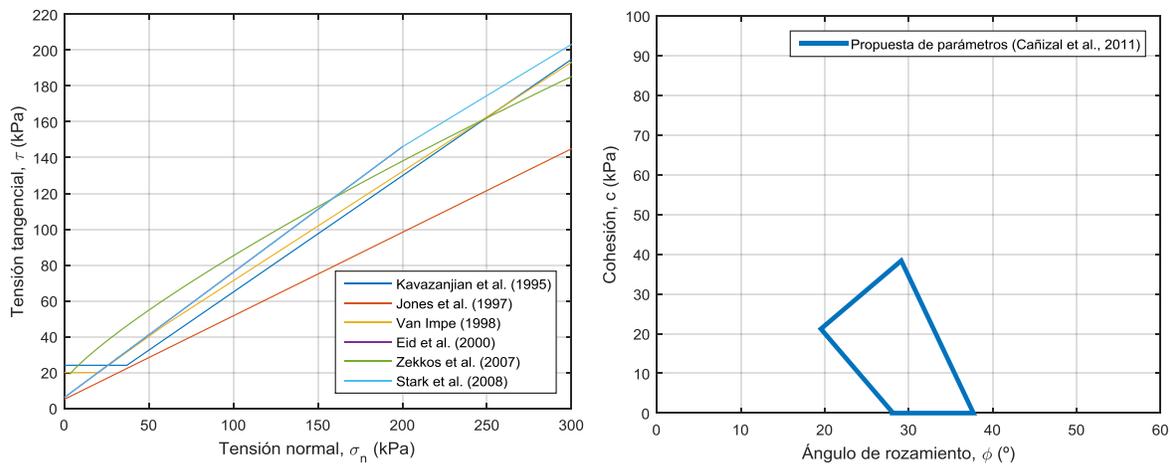


Figura 2.- Propuestas de parámetros resistentes para el diseño de vertederos (Lapeña, 2017)

3. Comparación entre ensayos de campo y ensayos de laboratorio

El estudio de residuos mediante ensayos de laboratorio conlleva una serie de problemas. La heterogeneidad y otras características de los rellenos impiden la obtención de muestras inalteradas e incluso dificultan la de muestras representativas, obligando a fabricar muestras con unas condiciones de composición, peso específico y humedad que representen la situación real. Las condiciones higiénico-sanitarias del ensayo son problemáticas, por el olor del material, su carácter infeccioso y el poder contaminante de los lixiviados que se generan. Por ello, no es aconsejable el ensayo de residuos en laboratorios de uso general.

Sin embargo este tipo de ensayo tiene un mayor control de las condiciones de ejecución siendo más sencilla su interpretación, generalmente, que la de los ensayos de campo. Además, no requiere de la ejecución de prospecciones pues pueden obtenerse muestras antes del vertido. Por estas ventajas y para paliar, en lo posible, los inconvenientes indicados en el párrafo anterior, el Grupo de Geotecnia de la U. C. dispone de un laboratorio exclusivo para la caracterización mecánica de residuos, externo a los edificios universitarios.



Figura 3. Interior del laboratorio de caracterización geotécnica de residuos de la U.C.

Alternativamente, los ensayos de campo actúan sobre el material en condiciones reales, no en una situación simulada en laboratorio con muestras que han sufrido una manipulación y alteración. La escala es mayor que en los ensayos de laboratorio, lo que disminuye la influencia de la heterogeneidad en los resultados. Así mismo, las condiciones higiénico-sanitarias durante la realización de este tipo de ensayos son mejores, al no tener que extraer y manipular los residuos. En general son también más económicos, lo que permite realizar campañas más extensas e investigar la variación temporal de las características de los vertidos.

Sin embargo, la ejecución de ensayos de campo presenta problemas adicionales. La introducción de los útiles de ensayo produce cierta alteración de la zona de ensayo. El control de las condiciones del ensayo es menor que en laboratorio y su interpretación es más compleja y normalmente se basa en correlaciones y ábacos empíricos, que se han obtenido para suelos y su aplicación en el estudio de residuos es cuestionable.

4. Ensayos de Campo

Para la caracterización de residuos R.S.U., convencionales se han seleccionado los ensayos presiométricos en sondeo (PBP) y los de penetración estática (CPTu). Del uso conjunto de ambas técnicas se obtienen tanto parámetros resistentes como deformacionales. Se han realizado 53 ensayos PBP y 29 CPTu.

4.1. Ensayos presiométricos en sondeo (PBP)

El ensayo presiométrico PBP (Pre-Bored Pressuremeter) consiste en la aplicación sobre las paredes del sondeo de una presión radial mediante el inflado de una membrana en su interior. De la curva presión-deformación radial se obtienen las características del material.

En el caso de los R.S.U. no se alcanza la deformación para llegar a la rotura. Como el uso de los modelos existentes para suelos no es directo, de la campaña realizada sólo se deducen valores de los parámetros deformacionales, concretamente los módulos de corte en la rama de carga G_L y en la de recarga G_R .

4.2. Ensayos de penetración estática (CPTu)

El ensayo de penetración estática CPT (Cone Penetration Test) consiste en la hincada de una punta cónica en el terreno a velocidad constante, registrando, a través de la fuerza necesaria para el hincado, la resistencia por punta (q_c), y la que se produce en el fuste (f_s). La heterogeneidad del residuo obliga a un tratamiento previo de los resultados, mediante la obtención de rangos con comportamientos similares y eliminando las medidas puntuales inusualmente altas (picos) que no tienen influencia en el comportamiento general.

De los resultados de la campaña realizada puede obtenerse el tipo de comportamiento del material usando ábacos SBT (Soil Behavior Type), como el propuesto por Robertson (2010) en su versión no normalizada (Figura 4). Se deduce que el tipo de comportamiento de los residuos convencionales R.S.U. ensayados se corresponde con el de arenas y mezclas de arenas y limos, lo que es consistente con la bibliografía.

Determinado el comportamiento primordialmente friccional de los residuos, puede utilizarse el ábaco de Robertson y Campanella (1983) para la obtención de los valores del ángulo de rozamiento (Figura 4). Con dichos valores se relaciona mediante la expresión ($\tau = \sigma'_n \cdot \tan(\phi)$) la resistencia de corte con la tensión normal, válida para materiales puramente friccionales, y se ajustan los valores resultantes a diversos criterios de rotura lineales o no (Lapeña, 2017).

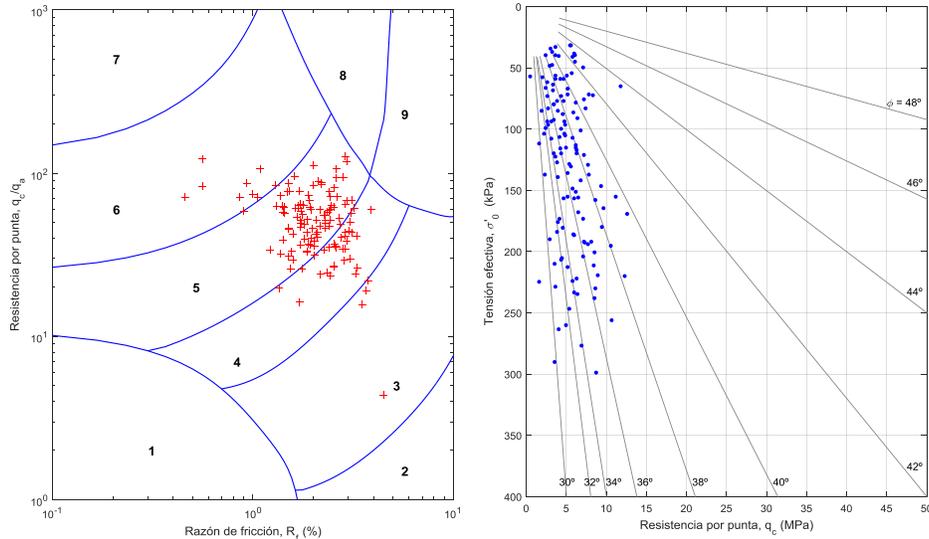


Figura 4.- Representación de los resultados en los ábacos de Robertson (2010) y de Robertson y Campanella (1983)

5. Ensayos de laboratorio

En la campaña se ha estudiado residuo procedente de una planta de tratamiento mecánico y biológico (M.B.T.) ensayando muestras de rechazo de afino, y de escorias de incineradora en proporción variable. En total han sido 30 probetas de corte directo y 21 de compresión triaxial consolidadas drenadas (CD).

5.1. Ensayos de corte directo

Por el tamaño de los elementos que componen una muestra de R.S.U. es aconsejable el uso de probetas de gran tamaño. Aunque el pretratamiento de los M.B.T. reduce su tamaño sigue siendo suficientemente grande para mantener esta recomendación. Entre el 15 y el 20% en peso de material es de tamaño superior a 20 mm (Molleda, 2017), valor máximo permitido en la caja de corte de 300 mm de lado usada.

La elevada deformabilidad de los residuos ha obligado a la modificación del aparato de corte. Se ha añadido un suplemento superior a la caja para preservar un espesor suficiente de probeta tras la compactación, además de incluir una célula de carga para controlar la carga vertical. Por otro lado, se han modificado los elementos del tren de carga horizontal para aumentar su recorrido.

Al contrario de lo que sucede en residuos sin tratar, durante los ensayos se ha alcanzado un valor máximo de la tensión tangencial, que ha permitido obtener los valores de los parámetros resistentes en situación de rotura. En la Figura 5 se muestran las curvas de rotura correspondientes a un ensayo realizado sobre una mezcla de los residuos estudiados. De estos ensayos se obtiene también el valor de la dilatancia.

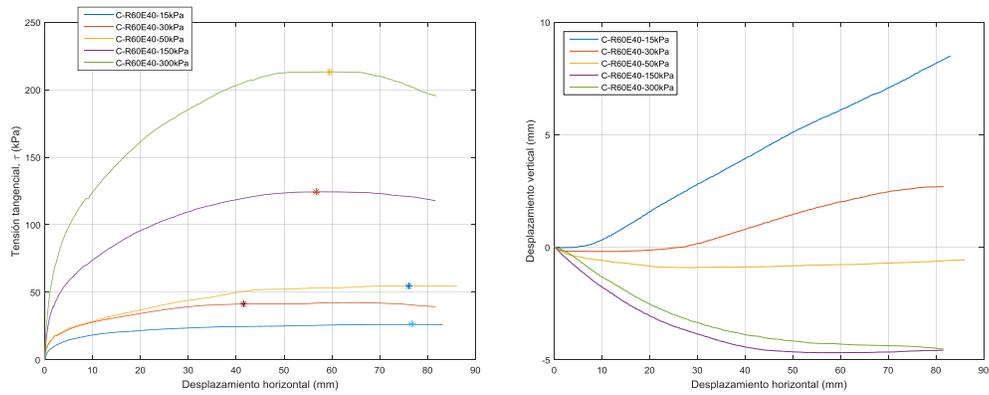


Figura 5.- Curvas de rotura de un ensayo de corte directo

5.2. Ensayos de compresión triaxial

Los ensayos de compresión triaxial se han realizado con drenaje, sobre probetas de 100 mm de diámetro, para permitir un tamaño máximo de partícula de 20 mm, al igual que en los ensayos de corte directo.

Se han modificado el cabezal y el vástago, diseñando una guía que evite el giro excesivo de la cara superior de la probeta observado durante la aplicación de la carga vertical (desviadora). Se ha elegido un medidor de cambio de volumen de gran capacidad (200 cm³) atendiendo a la deformabilidad de los residuos.

En la Figura 6 se representan las curvas de rotura obtenidas en el ensayo de una de las muestras.

Durante el ensayo sobre muestras conteniendo rechazo de afino no se alcanza un valor máximo de la tensión desviadora. En estos casos es habitual la obtención de los parámetros resistentes movilizados a una deformación máxima compatible con el resto de elementos del vertedero. En la campaña realizada se han obtenido los valores de la cohesión y el ángulo de rozamiento para el 5, 10, 15, 20 y 25% de deformación. Sin embargo, los ensayos sobre escorias de incineradora sí muestran rotura de pico y crítica dentro del rango de deformaciones alcanzado durante el ensayo.

Además, de los ensayos de compresión triaxial CD pueden obtenerse valores de los parámetros de deformación: dilatancia, módulo de Young y coeficiente de Poisson.

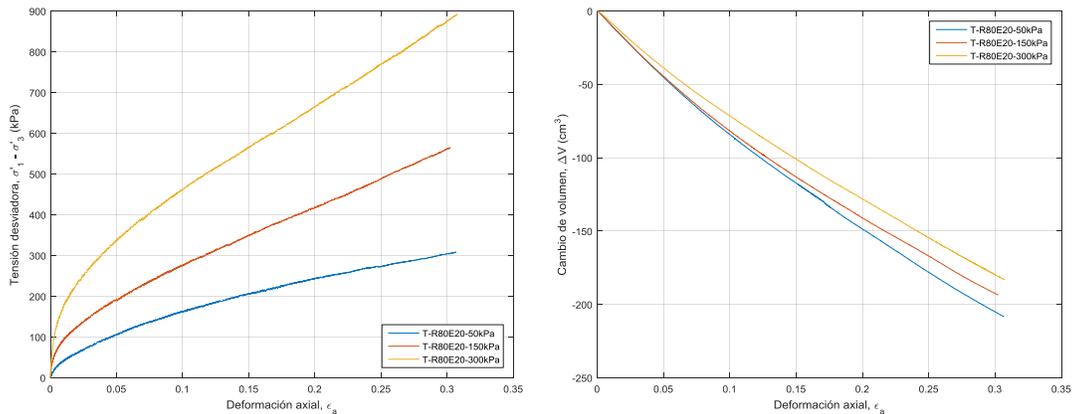


Figura 6.- Curvas de rotura de un ensayo triaxial C.D.

6. Conclusiones

La determinación de las características mecánicas de los R.S.U. es posible usando técnicas de ensayo de laboratorio y campo utilizadas en campañas geotécnicas convencionales.

La utilización conjunta de ensayos presiométricos PBP y de penetración estática CPTu en vertedero ha permitido la obtención tanto de parámetros resistentes como deformacionales, lo que ha requerido una ligera modificación de los procedimientos descritos en las normas correspondientes.

Para la caracterización en laboratorio es necesaria la utilización de probetas de grandes dimensiones. La utilización de una caja de corte de 300 mm de lado y probetas triaxiales de 100 mm de diámetro ha resultado adecuada en la campaña experimental realizada.

La gran deformabilidad de los residuos hace necesaria la adaptación de algunos de los equipos de laboratorio con el fin de permitir mayores desplazamientos o deformaciones, así como utilizar mayor volumen de material previamente a la compactación para conseguir una probeta de espesor adecuado. En la mayoría de los ensayos, debido a las grandes deformaciones necesarias para alcanzar el estado de rotura, es necesario establecer criterios resistentes basados en deformaciones máximas admisibles.

Referencias

- Cañizal, J., Lapeña, P., Castro, J., Da Costa, A., y Sagasetta, C. (2011). Determination of shear strength of MSW. Field tests vs. laboratory tests. HPM4 Workshop. (Santander, España).
- Eid, H.T, Stark, T.D, Douglas, W.D. y Sherry, P.E. (2000). Municipal Solid waste slope failure 1. Waste and foundation properties. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.126, Nº.5: 397-407.
- Kavazanjian E., Matasović N., Bonaparte R., y Schmertmann G. R. 1995. Evaluation of MSW Properties for Seismic Analysis. *Proc. GeoEnvironment 2000, Special Geotechnical Publication, ASCE*.
- Lapeña, P. (2017). Caracterización experimental del comportamiento resistente de vertederos de residuos sólidos urbanos convencionales y sometidos a pre-tratamiento. Tesis doctoral. Univ. de Cantabria.
- Molleda, A. (2017). Características detalladas y potencial contaminante en vertedero del rechazo de tratamiento mecánico biológico de residuos municipales: el caso español. Tesis doctoral. Univ. de Cantabria.
- Robertson, P.K., y Campanella R.G. Interpretation of Cone Penetration Tests – Part I (Sand). (1983). *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 20, Nº. 4
- Robertson, P.K., Soil behavior type from the CPT: an update. (2010). 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA.
- Stark, T., Huvaj-Sarihan, N., y Li, G., (2008). "Shear strength of municipal solid waste for stability analyses". *Environ Geol*. 57: pp.1911–1923.
- Van Impe, W.F. (1998). Environmental geotechnics: ITC 5 Activities, state of art. In: *Proceedings, 3rd international congress on environmental geotechnics, Vol 4, 1163–1187*
- Zekkos D., Bray, J.D., Athanasopoulos, G.A., Riemer, M.F., Kavazanjian, E., Founta, P.A. y Grizi, A. (2007). Compositional and loading rate effects on the shear strength of municipal solid waste. 4th Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering (Tsalónica, Grecia)
- Zekkos D., Bray, J.D., Riemer, M.F., Kavazanjian, y Athanasopoulos, G.A. (2007). Response of municipal solid-waste from Tri-Cities landfill in triaxial compression. 11th Int. Waste Manag. & Landfill Symp. (Cerdeña, Italia)