

Análisis de estabilidad a largo plazo de la ampliación en altura del relleno sanitario de Rivadavia, Provincia de San Juan, Argentina

J. P. Ibañez

Juan.pablo.ibanez@ingenieria.uncuyo.edu.ar

Instituto IMERIS, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.

M. H. Turcuman

mturcuman@ims.unsj.edu.ar

Instituto de Materiales y Suelos. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

RESUMEN: El relleno sanitario de Rivadavia, construido en el año 2011 en la provincia de San Juan, fue diseñado con una capacidad de $1.214.346\text{m}^3$ para 15 años de vida útil. Debido a la deficiencia en alcanzar las densidades de proyecto en la disposición de los residuos compactados, el relleno fue completado en el año 2015. Por tal motivo recientemente se diseñó y ejecutó una ampliación en altura del mismo, construyendo unos terraplenes perimetrales. La estabilidad de los taludes proyectados se verificó con métodos determinísticos de equilibrio límite convencionales, asignando a las masas de residuos un valor de densidad y resistencia al corte estimados, más sin medición de los mismos en laboratorio o campo. En este trabajo se modela la estabilidad a largo plazo de la ampliación del relleno con elementos finitos 2D, utilizando modelo de creep y reproduciendo las distintas etapas constructivas. Para cada etapa constructiva se analiza la estabilidad y se estiman los asentamientos. Adicionalmente se establece un rango de variación en el parámetro friccional de resistencia al corte de los residuos, a fin de contemplar las incertidumbres sobre este parámetro crucial en el cálculo de la estabilidad. Los resultados son presentados y discutidos, indicándose las conclusiones obtenidas.

Palabras clave: RESIDUOS SÓLIDOS – RELLENO SANITARIO – ESTABILIDAD – ASIENTOS – MODELOS

ABSTRACT: The Rivadavia landfill was built in 2011 in San Juan province. It was projected with a fill capacity of $1.214.346\text{m}^3$ to be filled by 15 years of operation time. Nevertheless, due to operational deficiencies in infill compaction, target densities were not achieved, so the landfill was completely filled in 2015. For that, an extension in high of the landfill was recently projected and executed, by construction of some perimeter embankments. Stability of those projected embankments was verified by using conventional deterministic methods of limit equilibrium. For calculations values of densities and shear strength were assigned to the waste mass, but without any field or laboratory measurement. In this work it is analyzed the long term slope stability of the projected landfill extension, by using two dimensional finite element method. We use creep model for waste material and reproduce all the constructive stages, analyzing stability and estimating settlements. Additionally, it is defined a variation range for the internal friction parameter of waste material, and a sensitivity analysis is made in order to consider the uncertainty of

such critical parameter and the effect in slope stability. Results are showed and discussed, and the conclusions are finally presented.

KEY WORDS: SOLID WASTE – LANDFILL – STABILITY – SETTLEMENTS – MODEL

1 INTRODUCCIÓN

Los rellenos sanitarios son instalaciones físicas diseñadas para contener los rechazos provenientes de los residuos sólidos urbanos (RSU), constituyendo obras de ingeniería geotécnica diseñadas para reducir el impacto sobre el ambiente y la salud pública. Durante su llenado y después de su clausura, los rellenos depositados con algún grado de compactación sufren asentamientos por procesos de consolidación que se extienden en el tiempo. Estos asentamientos están asociados a cambios físico-químico-biológicos en la masa de residuos, que afectan la resistencia mecánica de relleno y por lo tanto la estabilidad de los taludes del mismo.

En el presente trabajo se evalúa el caso de un proyecto de ampliación del relleno sanitario de Rivadavia, en la Provincia de San Juan. Este relleno sanitario se encuentra ubicado entre lomadas pedemontanas y depósitos aluviales, dentro de las áreas más desérticas del país, con veranos muy calurosos e inviernos fríos, y días soleados todo el año (ver Figura 1).



Figura 1. Emplazamiento del relleno de Rivadavia, construido con forma de pentágono

El relleno está localizado en una zona árida. Los valores de humedad son bajos todo el año y las precipitaciones escasas estando en la isohieta de los 100mm anuales de promedio. El periodo de lluvias

va de diciembre a febrero tratándose de lluvias torrenciales de gran intensidad y corta duración. Además, la provincia está en la zona con mayor actividad sísmica del país. El RSU del Gran San Juan responde a bajo contenido de materia orgánica y el residuo posee un nivel muy bajo de humedad, estimado alrededor del 15%.

El relleno sanitario de Rivadavia fue inaugurado en el año 2011 y se gestionan allí más del 80% de los RSU generados en la provincia de San Juan. El mismo está en operación todos los días del año para deposición final de RSU, así como residuos industriales asimilables a urbanos. Ingresan en promedio 17.000t/mes al relleno sanitario, variando a lo largo de la semana, entre los valores de 700t/día los lunes y 400t/día los sábados.

Este relleno sanitario se proyectó para una vida útil de 15 años, cuyo diseño respondía a 115 celdas dispuestas en 3 niveles, correspondiendo a un módulo con un volumen total de 1.214.346m³ (Ref. [1][2][3]). Este módulo se completó antes de lo previsto, por lo que en el año 2016 se propuso la ampliación del relleno sanitario, mediante la construcción de un terraplén perimetral para la contención de las nuevas celdas a ser incorporadas al relleno.

2 PROYECTO DE AMPLIACIÓN DEL RELLENO

2.1 Características geotécnicas del proyecto

El terraplén perimetral proyectado para la ampliación consiste en una estructura de suelo compactado que forma el cierre del vaso destinado a la ampliación del módulo del relleno sanitario. Dicho vaso tiene como cierre el talud del módulo existente hacia el norte, la topografía natural de la zona hacia el sur y el oeste y el propuesto terraplén hacia el este (ver figura 2). Fundado sobre el coronamiento del terraplén lateral existente, el terraplén de ampliación (también denominado caballón) se proyectó de 3,00m de alto, con una pendiente de talud exterior de 1:2,5 (V:H), una pendiente de talud interior de 1:1,5 (V:H) y un ancho de coronamiento de 3,00m. Así mismo se tuvo en cuenta tres nuevas celdas de relleno sanitario, fundadas sobre las celdas existentes, contenidas por el terraplén propuesto, con alturas de 7,70m, 10m y 10m respectivamente, pendientes de talud 1:3 (V:H). Para la protección y acabado de los taludes de las nuevas celdas se proyectó una capa de material granular de un metro de espesor.

Para la operación de las nuevas celdas se proyectaron cuatro caminos de acceso a diferentes niveles. El primer camino se sitúa sobre el coronamiento del nuevo terraplén perimetral. Los otros tres caminos se proyectaron sobre el coronamiento de cada una de las tres celdas proyectadas, a ser materializados con suelo compactado una vez terminada la respectiva celda. De esta forma el talud global de la ampliación se escalona a fin de tener mayor estabilidad.

2.2 Cálculo de estabilidad de los taludes proyectados

Como parte del diseño de los terraplenes perimetrales, las nuevas celdas y sus respectivos taludes, se realizaron estudios de estabilidad de los taludes de la ampliación del relleno, mediante:

- análisis estático para cargas de servicio;
- pseudo-estático para el caso de sismo.

Los parámetros geotécnicos de los materiales adoptados para los análisis de estabilidad se indican en la tabla 1. De todos los materiales, el residuo compactado es el que presenta mayor grado de incertidumbre, dada la heterogeneidad de su composición, su irregular grado de compactación y su pérdida de masa en el tiempo debido a los procesos biológicos que degradan la materia orgánica.



Figura 2. Foto satelital del emplazamiento del relleno con detalle de la zona de ampliación

En el caso estático, que nos ocupa en el presente trabajo, se utilizó el método del equilibrio límite de Bishop simplificado, que utiliza superficie de rotura circular, en la sección de la Figura 3. En este tipo de análisis se toma en cuenta la densidad y resistencia al corte del material RSU, sin considerar las deformaciones sufridas en el proceso de carga o por “creep”. También se incluyó una carga distribuida de 22kN/m en los caminos de acceso, para considerar el peso del tránsito de camiones y maquinaria pesada. El factor de seguridad fue de 1,617 para el círculo mostrado en dicha figura.

Ya en el caso pseudo-estático, para un sismo severo, el factor de seguridad fue menor que 1, con lo cual es de esperarse desplazamientos importantes en los taludes en caso de sismo.

Tabla 1. Parámetros geotécnicos de los materiales adoptados para los análisis de estabilidad

Material	Densidad (kN/m ³)	Cohesión (kN/m ²)	Ángulo de fricción ϕ (°)
Suelo natural de base	17	-	25
Suelo de cierre del relleno	20	-	33
Terraplén existente	21	-	35
Terraplén proyectado (caballón)	22	-	33
Residuo compactado	14	-	23

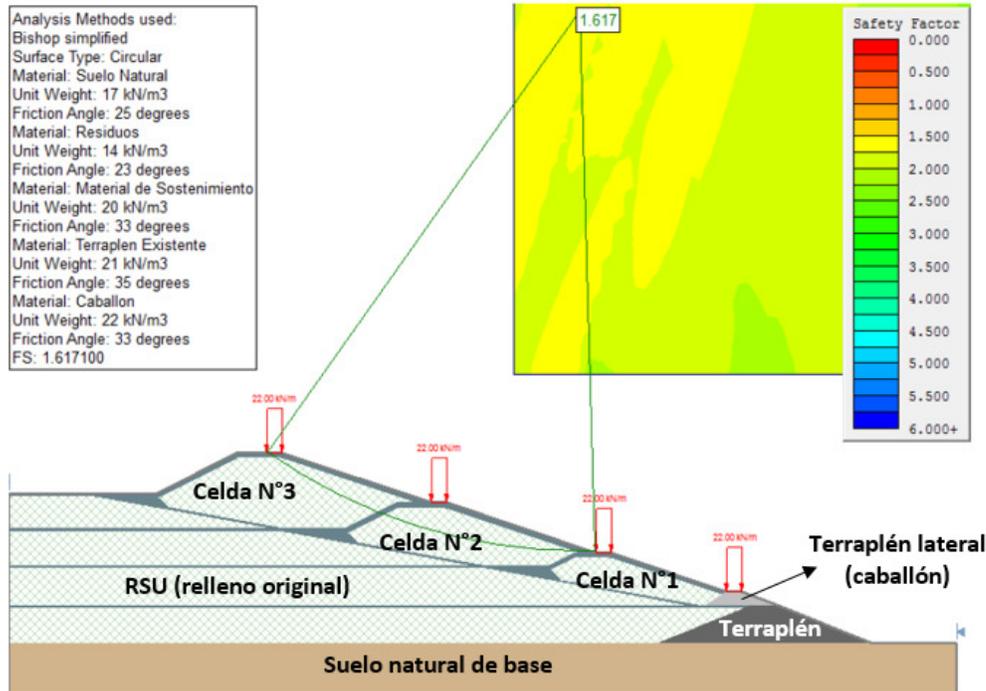


Figura 3. Sección transversal para el análisis de estabilidad por método de Bishop simplificado

3 MODELADO NUMÉRICO DE LA AMPLIACIÓN DEL RELLENO

3.1 Modelado constitutivo

A fin de analizar el comportamiento tenso-deformacional diferido en el tiempo de la obra de ampliación del relleno, se modeló numéricamente por el método de los elementos finitos una sección representativa del mismo. Se definieron cuatro materiales diferentes:

- el suelo natural de base;
- el suelo del terraplén perimetral (caballón);
- el residuo ya consolidado del relleno actual;
- el residuo que ingresará en las tres etapas de ampliación.

El material correspondiente al residuo en la ampliación se modeló utilizando el modelo constitutivo de suelo blando con fluencia (Soft Soil Creep Model, SSCM). Este modelo es una extensión del modelo clásico de endurecimiento plástico "Cam Clay Model" incluyendo una formulación viscoplástica de "creep" (Ref. [4]). La ecuación que describe el fenómeno de "creep" en la condición edométrica (compresión unidimensional confinada lateralmente) a tensión constante es:

$$\varepsilon = \varepsilon_c - C_\alpha \cdot \log\left(\frac{t}{t_c}\right) \text{ para } t > t_c \quad (1)$$

siendo t el tiempo desde el inicio de la carga, t_c el tiempo de finalización de la consolidación primaria (e inicio de la fluencia), ε la deformación de fluencia, ε_c la deformación a la finalización de la consolidación,

C_α el parámetro de fluencia del material. Esta ley logarítmica de creep se asemeja a la propuesta por Sowers (Ref. [5]) para la consolidación secundaria S_s de RSU:

$$S_s = (C_\alpha / (1 + e_0)) \cdot H \cdot \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (2)$$

Donde e_0 es la relación de vacíos inicial. De esta forma, luego de la consolidación primaria provocada por una carga (controlada por el coeficiente de compresibilidad primaria C_c), comienza un proceso de fluencia lenta a carga constante (controlado por el coeficiente de compresibilidad secundaria C_α). En el caso del relleno de Rivadavia, la escasa humedad de los RSU hace que el proceso de consolidación no llegue a desarrollarse en el tiempo, pasando así de las deformaciones elásticas iniciales al proceso de fluencia lenta o creep.

Este modelo SSCM define además una rigidez del material dependiente del nivel de tensión, e incluye el criterio de rotura o plastificación de Mohr-Coulomb. Para más detalles, consultar Ref. [3] y Ref. [4] donde se presenta la validación detallada de este modelo de “creep” con el modelo teórico de Sowers para estimación de asientos en RSU.

3.2 Parámetros adoptados

La calibración de los modelos constitutivos fue realizada asumiendo valores que fueron adoptados con base a experiencias previas de investigación sobre este mismo relleno (Ref. [1][2][3]). Se balanceó la información recomendada de la bibliografía, con los datos disponibles de los RSU del relleno de Rivadavia y la técnica de deposición de los mismos en el relleno.

En lo referente a la estabilidad de los taludes, resulta crítico establecer parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) que reflejen la real condición de los residuos compactados. Esto constituye un desafío, dado que en el caso del relleno que nos ocupa existe un alto grado de incertidumbre relacionado con:

- La variabilidad de la composición de los residuos. En rellenos de países más avanzados en política y práctica sanitaria la composición de los RSU resulta más homogénea y controlada, con elevado grado de separación de residuos por tipo y reciclado. En el relleno de Rivadavia, por otro lado, la heterogeneidad es muy alta, con escaso porcentaje de separación y reciclado.
- Las deficiencias en el método y control de compactación. Con métodos diseñados y controlados se pueden conseguir grados de compactación elevados, obteniendo RSU con densidades mayores y por lo tanto mayor resistencia al corte. En el caso del relleno de Rivadavia, planeado a 15 años, fue finalmente completado en 5 años, dado que no se lograron alcanzar las densidades objetivo para el RSU.
- La falta de mediciones. No hay mediciones de resistencia al corte del RSU en las condiciones de disposición en el relleno. Apenas hay estimaciones de densidades que pueden servir para algún tipo de correlación aproximada.

Por tales motivos, se debe ser cauteloso al realizar estimaciones de resistencia de este tipo de material, debiéndose recurrir a comparaciones con mediciones disponibles en la literatura. La figura 4a presenta el trabajo de Rakic (Ref. [6]) en la investigación de estos parámetros, donde se resume en un gráfico valores medidos en laboratorio, obtenidos por retro análisis y valores recomendados por diferentes autores. La figura 4b presenta la propuesta de Palma de valores esperables (Ref. [6]).

A partir de la ponderación de valores, se estableció un valor de cohesión de 5kPa y un ángulo de fricción interna de 20°, valores que se sitúan en el área de valores recomendados de la figura 4b. A fin de

contemplar la incertidumbre asociada a estos parámetros, se estableció un rango de variación para el ángulo de fricción interna de $\pm 3^\circ$, a los efectos de tener una sensibilidad a este parámetro por parte del factor de seguridad del talud del relleno. La Tabla 2 resume los parámetros utilizados para modelar el RSU tanto en el actual relleno, como el RSU que será incorporado en la ampliación.

Tabla 2. Parámetros para modelado del material RSU

Material	e0	Cc	C α	γ [kN/m3]	c [kPa]	ϕ (°)
RSU actual	0,60	0,125	0,01	13	5	23
RSU ampliación	0,80	0,200	0,03	10	5	20

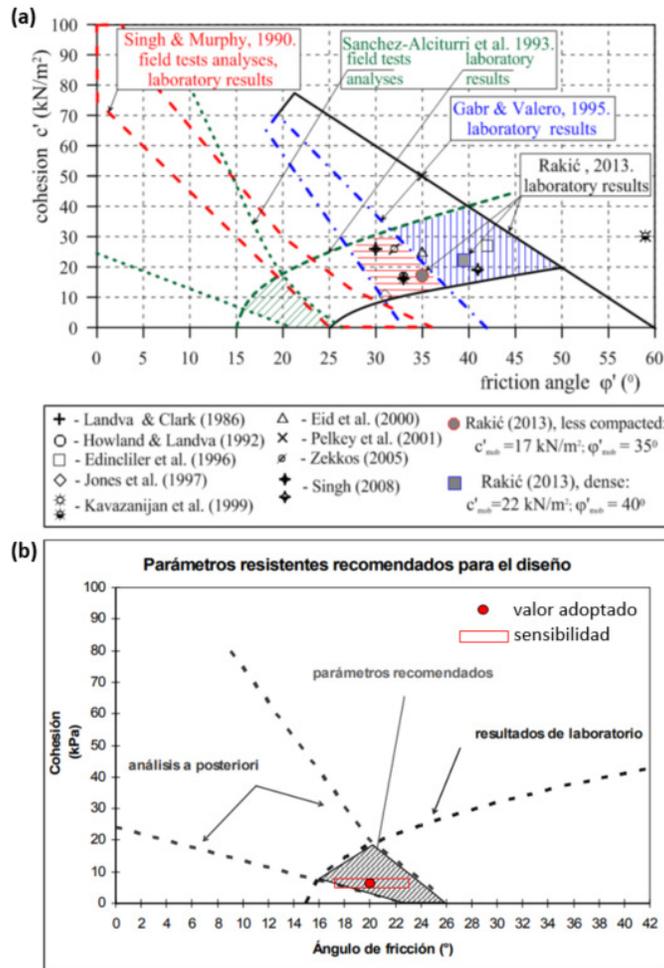


Figura 4. a) Parámetros de resistencia al corte de RSU medidos y rangos estimados por diversos autores (Ref. [6]); b) Parámetros de resistencia de RSU medidos y recomendados por Palma (Ref. [7]) y valores adoptados para el presente análisis de estabilidad

4 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE DEFORMABILIDAD Y ESTABILIDAD EN SERVICIO

4.1 Análisis de asientos

Se realizó un análisis para cada una de las tres etapas de ampliación, considerando un periodo de 180 días a partir de la ejecución de cada etapa para la evolución del fenómeno de “creep”. Para este tipo de modelado logarítmico de los asientos, los mismos se continúan desarrollando indefinidamente, aunque con una tasa de crecimiento cada vez menor. Tomando un periodo de 180 días aseguramos que se desarrollen más del 80% de los asientos totales. La Figura 5 presenta los resultados de asientos esperables para: a) Etapa 1: $d_{\text{vert}(\text{max})} = 1,19\text{m}$, b) Etapa 2: $d_{\text{vert}(\text{max})} = 2,30\text{m}$ y c) Etapa 3: $d_{\text{vert}(\text{max})} = 3,39\text{m}$.

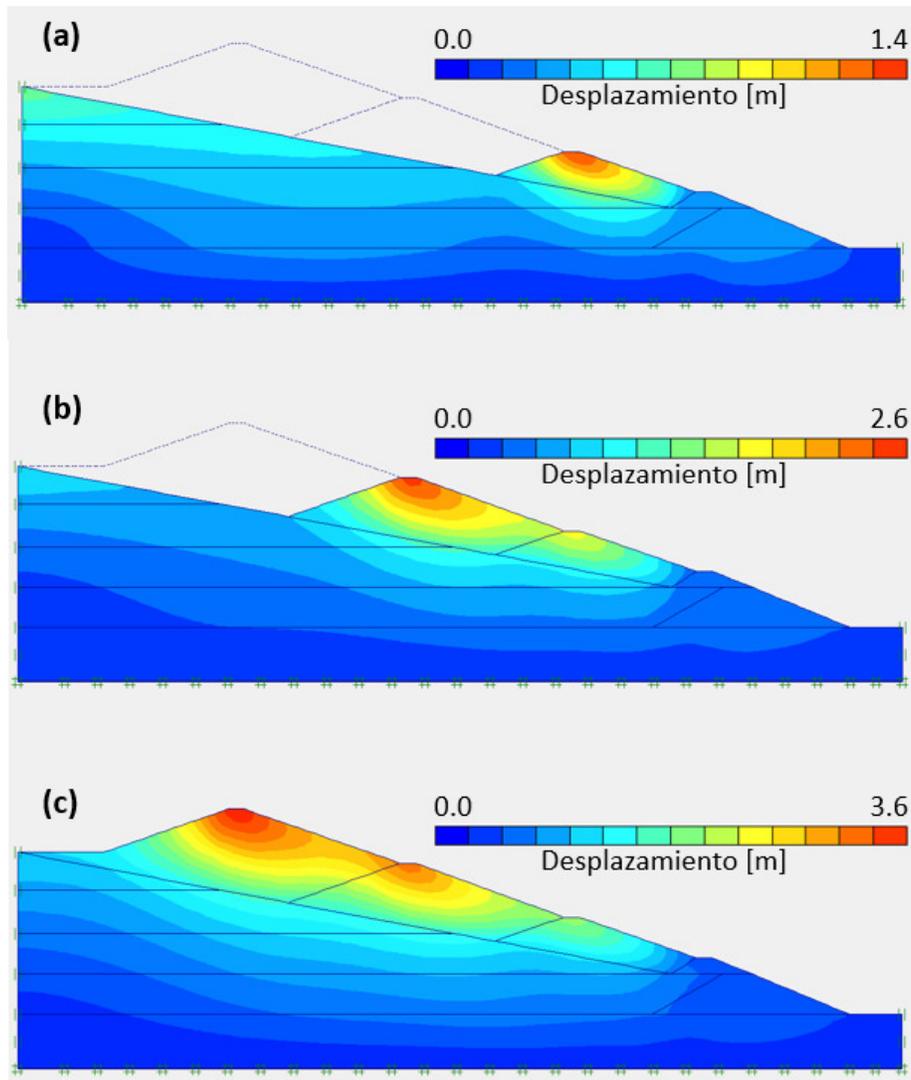


Figura 5. Desplazamientos totales en el relleno para las tres etapas de ampliación: a, b, c

La figura 6a muestra la malla de elementos finitos en su posición deformada, donde se puede apreciar que los asientos en el coronamiento de la ampliación del relleno se deben a la suma de tres factores:

- Principalmente asientos debido a deformación elástica y “creep” de los nuevos RSU compactados en las tres celdas de la ampliación;
- Asientos adicionales por deformación elástica y “creep” de los RSU del relleno existente, situados por debajo de las nuevas celdas;
- Asientos por deformación elástica del suelo base del relleno, siendo estos últimos insignificantes comparados a los asientos sufridos por los RSU.

La figura 6b muestra el mapa de vectores de desplazamiento en el relleno, donde predomina la componente vertical gravitacional, pero con una componente horizontal no despreciable en dirección del terraplén perimetral de soporte de la ampliación. El valor de desplazamiento máximo fue de $d_{vert}=3,39m$ en la zona del coronamiento de la tercera celda de la ampliación.

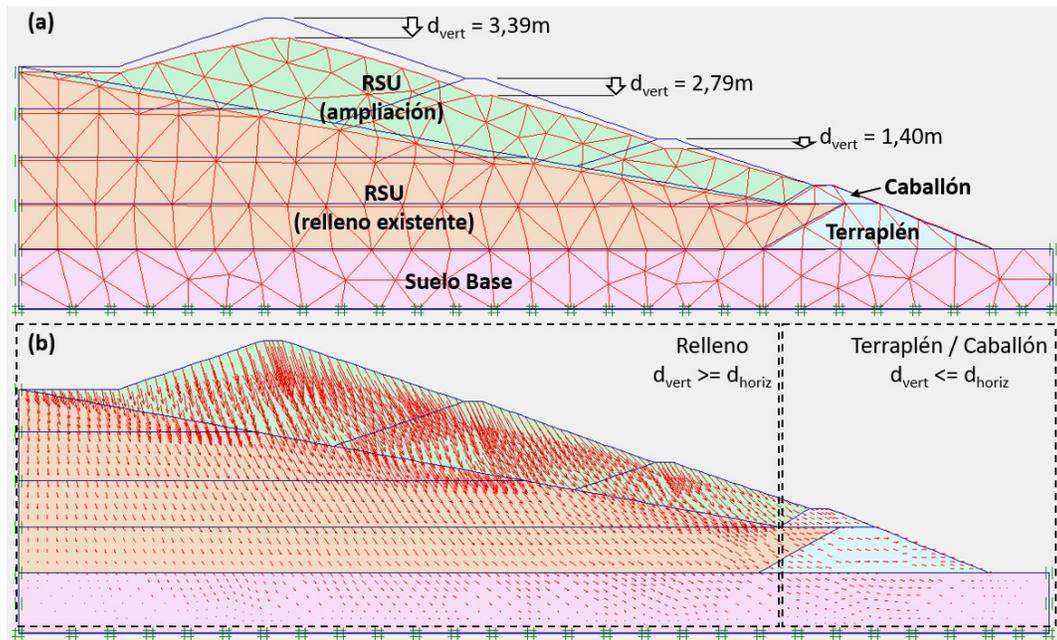


Figura 6. Estimación de asientos “d” en el relleno 180 días luego de la construcción de la ampliación: a) Malla deformada; b) Vectores de desplazamiento total con destaque de predominio de desplazamientos verticales y horizontales.

La figura 7 presenta los desplazamientos horizontales (7a) y verticales (7b) en la base y el coronamiento del terraplén perimetral (caballón) que soporta lateralmente las tres nuevas celdas del relleno. Se pueden apreciar tres escalones de desplazamientos laterales y asientos correspondientes a las tres fases constructivas de la ampliación:

- Fase 1 (Construcción de la celda N°1): Pasados 180 días de la construcción, se verifican asientos del orden de 9cm en el coronamiento, provocados principalmente por el peso de la celda N°1. Los desplazamientos laterales, con un máximo de 20cm, se deben a la presión lateral de la celda N°1 apoyada sobre el talud inclinado (1:5,50) del relleno ya ejecutado. En esta etapa el RSU joven

se comporta como un fluido viscoso, y el terraplén trabaja como muro de contención soportando el empuje del RSU.

- Fase 2 (Construcción de la celda N°2): Pasados 180 días de la construcción, la celda N°1 sufre un empuje lateral de la celda N°2 y lo repasa parcialmente al terraplén perimetral, que desplaza lateralmente unos 9cm adicionales, acumulando un total de 29cm. El terraplén no sufre asientos adicionales.
- Fase 3 (Construcción de la celda N°3): Pasados 180 días de la construcción, el terraplén soporta el empuje lateral de las tres celdas, y desplaza lateralmente unos 6cm adicionales, acumulando un total de 35cm. El terraplén no sufre asientos adicionales.

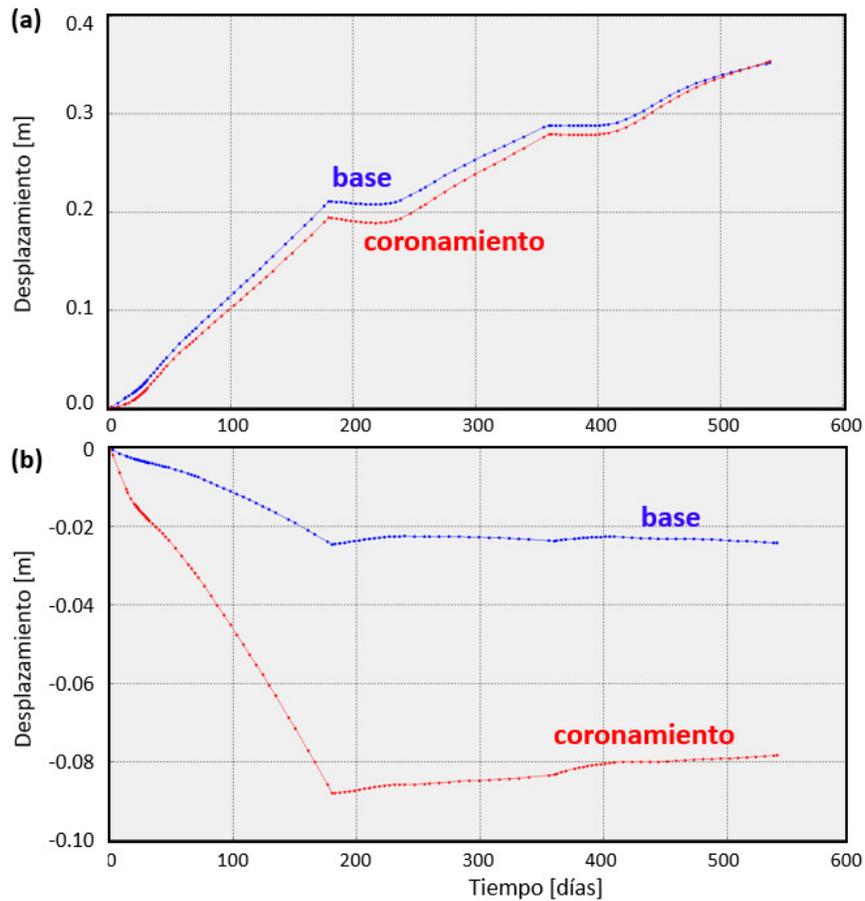


Figura 7. Estimación de: a) desplazamientos laterales, y b) asientos, del terraplén perimetral en la base (azul) y en el coronamiento (rojo).

La figura 8 presenta los desplazamientos horizontales (8a) y verticales (8b) en el coronamiento de la celda N°1 de la ampliación del relleno. Se pueden apreciar aquí también tres escalones de desplazamientos laterales y asientos correspondientes a las tres fases constructivas de la ampliación:

- Fase 1 (Construcción de la celda N°1): Pasados 180 días de la construcción, se verifican asientos del orden de 110cm provocados principalmente por el creep debido al peso propio de la celda.

Los desplazamientos laterales, con un máximo de 53cm, se deben a la disposición de la celda, apoyada sobre el talud inclinado (1:5,50) del relleno ya ejecutado.

- Fase 2 (Construcción de la celda N°2): Pasados 180 días de la construcción, la celda N°1 sufre el efecto del peso y el empuje lateral de la celda N°2. El coronamiento sufre un asiento adicional de 20cm y desplaza lateralmente unos 22cm adicionales.
- Fase 3 (Construcción de la celda N°3): Pasados 180 días de la construcción, la celda N°1 soporta el empuje lateral de las celdas N°2 y N°3 en menor medida. El coronamiento asienta otros 10cm acumulando un total de 140cm, y desplaza lateralmente otros 25cm adicionales, acumulando un total de 100cm.

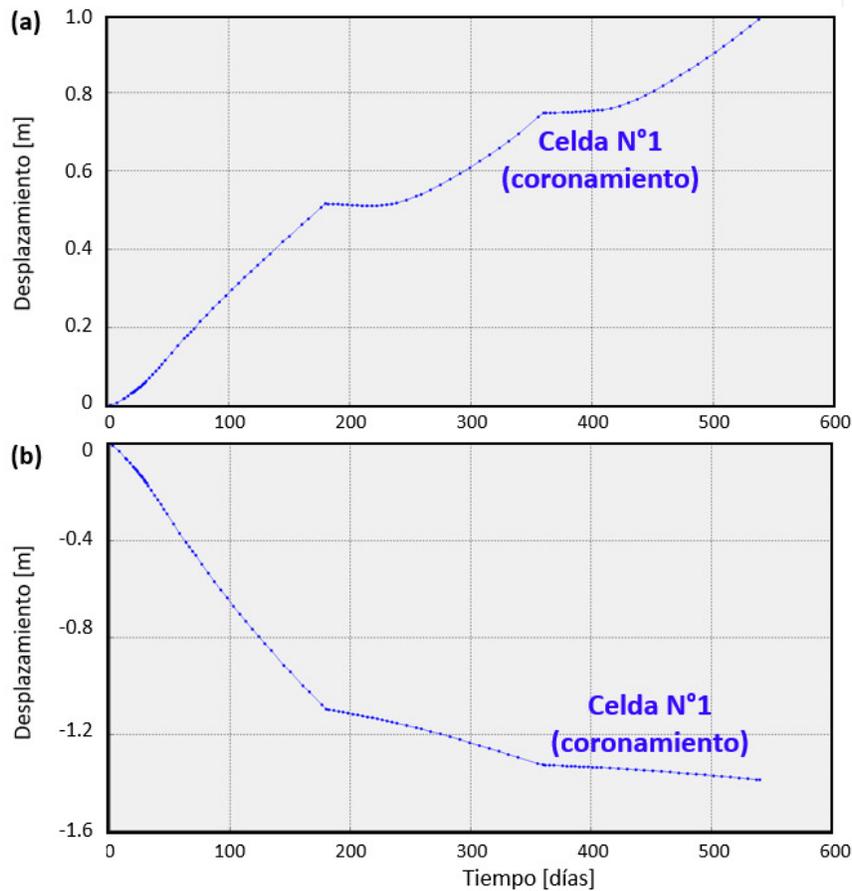


Figura 8. Estimación de: a) desplazamientos laterales, y b) asientos, del coronamiento de la celda N°1.

4.2 Análisis de estabilidad

Se realizó para cada una de las tres etapas de ampliación, incluyendo una carga de 22kN/m en cada camino de acceso para considerar la carga de los equipos que operan el relleno. Se utilizó el método de

reducción de los parámetros de resistencia al corte para calcular el factor de seguridad FS del relleno. La Figura 9 presenta la formación de la superficie de deslizamiento y el factor de seguridad obtenido en cada caso, a) Etapa 1: FS = 1,73, b) Etapa 2: FS = 1,55 y c) Etapa 3: FS = 1,47.

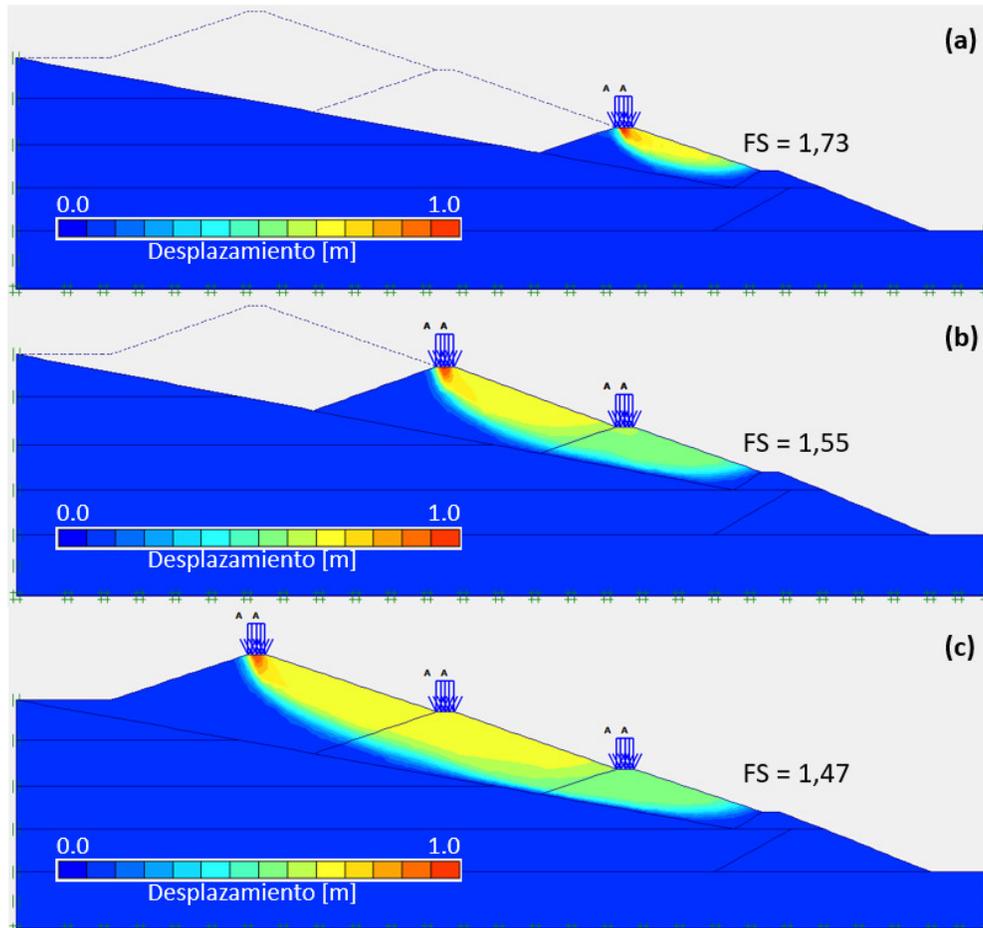


Figura 9. Superficies de rotura potenciales en el relleno y factor de seguridad FS para las tres etapas de ampliación: a) Después de completada la primera celda; b) Después de completada la segunda celda; c) Después de completada la tercera celda.

5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El análisis de deformabilidad y asientos mostró que los desplazamientos se darían principalmente en la masa de residuos compactados jóvenes, y son esperables descensos importantes y corrimientos laterales en los coronamientos de las celdas. En cuanto a las magnitudes, son estimaciones que indican apenas un orden de magnitud, que está de acuerdo a lo esperable en este tipo de material.

En cuanto al terraplén perimetral (caballón), se trata de un elemento clave para la estabilidad de todo el talud. Por tal motivo, los desplazamientos laterales de 35cm obtenidos mediante modelado numérico apuntan a la necesidad de verificaciones adicionales del terraplén al deslizamiento por su base. También

indican la necesidad de tener un monitoreo del mismo, a fin de detectar cualquier indicio de desplazamientos laterales del mismo.

El análisis de estabilidad, por otro lado, mostró que el volumen inestable incluye al RSU compactado en cada etapa, pero no al terraplén perimetral de soporte. Y la condición menos favorable se da en la tercera etapa, al completar la ampliación (FS = 1,47). Esta estabilidad depende altamente del ángulo de fricción interna del material ($\phi=20^\circ$), cuyo valor es apenas estimado, siendo crucial el RSU por tratarse de un material heterogéneo y sujeto a variación temporal en su composición. Por tal motivo se realizó una sensibilidad del FS en relación a este parámetro ($\phi=20^\circ\pm 3^\circ$), como se muestra en la Figura 10.

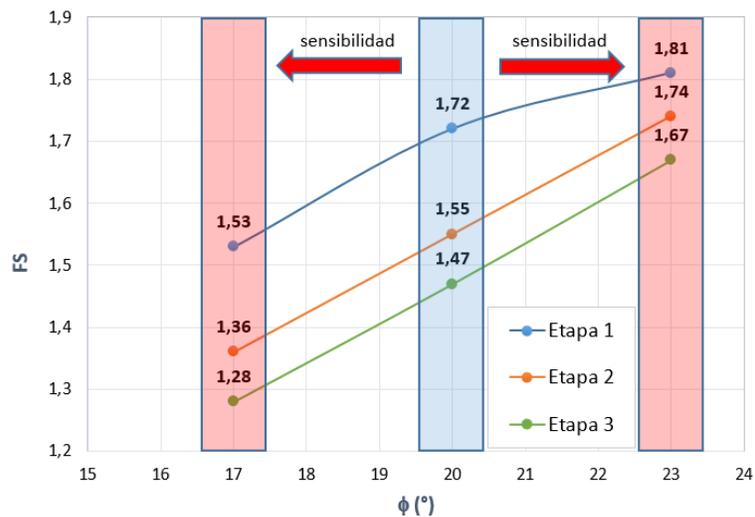


Figura 10. Sensibilidad del FS al parámetro ϕ del RSU, para cada etapa de la ampliación del relleno.

Se puede apreciar que en caso de un RSU de bajo valor de fricción ($\phi = 17^\circ$), la etapa 3 presenta un FS = 1,28 representando una estabilidad con escaso margen de seguridad, sobre todo ante una acción adicional extraordinaria (sismo o una lluvia torrencial o prolongada). Con un $\phi = 15^\circ$, finalmente, el talud sería inestable. Esta apreciación guarda un acuerdo general con los valores de resistencia al corte medidos y recomendados de la figura 4a y 4b (Ref. [6] [7]).

La única manera, en general, de asegurar que los RSU alcancen valores confiables de cohesión y fricción es con una compactación adecuada que garantice la densidad objetivo proyectada. Esto, por otro lado, no es fácil de conseguir, y de hecho no se consiguió en el caso del relleno de Rivadavia, lo que motivó la ampliación objeto del presente trabajo. Siendo así, se necesita contemplar la incertidumbre en los parámetros de los RSU compactados en las tres celdas de la ampliación, como realizado en el análisis de sensibilidad.

6 CONCLUSIONES

Un análisis de deformabilidad, asentamientos y estabilidad fue realizado sobre el proyecto de ampliación del relleno de Rivadavia. Para esto se utilizó análisis por elementos finitos y un modelado constitutivo de los

materiales del relleno incluyendo deformación por “creep”. Se buscó un mejor entendimiento de los procesos de deformación que sufrirá el relleno en sus etapas de operación, así como considerar estos procesos en los análisis de estabilidad y cálculo de asentos. En el caso de estudio se puede considerar que el terraplén perimetral se diseñó adecuadamente para las cargas de servicio, siempre y cuando las características de los RSU de la ampliación se correspondan con los parámetros asumidos en el modelado. Sin embargo, los resultados apuntan la necesidad de verificar con mayor detalle la estabilidad a deslizamiento por la base del terraplén perimetral (caballón). El estudio de sensibilidad del parámetro de fricción para resistencia al corte del RSU muestra la importancia de la medición de parámetros de RSU en campo y laboratorio, a fin de que las estimaciones se ajusten mejor al material efectivamente dispuesto en el relleno. El peligro aquí radica en sobreestimar los parámetros de resistencia al corte y en consecuencia proyectar y ejecutar rellenos poco seguros. En el caso de este relleno el riesgo es muy bajo dado que el mismo está emplazado en una zona no urbanizada, pero puede ser peligroso en rellenos colindantes con zonas urbanizadas.

REFERENCIAS

- [1] Turcumán, M.H.; Ibañez, J. P. (2013). Sensibilidad Paramétrica de los Modelos de Sowers, Meruelo y Gandola. V Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos Sólidos. Facultad de Ingeniería. UNCuyo, Mendoza, Argentina.
- [2] Turcumán, M. H. (2014). Análisis de la compresibilidad de residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios. Modelos teóricos y su aplicación a la región de Cuyo. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.
- [3] Ibañez, J. P.; Turcuman, M.H. (2015). Estimación de asentos en rellenos de RSU utilizando un Modelo Constitutivo de Creep en dos dimensiones. Memorias del VI Simposio Iberoamericano de Ingeniería en Residuos Sólidos, hacia la carbono neutralidad 2021. Cartago, Costa Rica, 9 a 11 de Nov. 2015.
- [4] Vermeer, P.A. & Neher, H. (1999). A soft soil model that accounts for creep. In R.B.J. Brinkgreve, Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Balkema, Rotterdam, 249-261.
- [5] Sowers G. F. (1973). “Settlements of waste disposal fill”. Proc 8th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Moscow, Rusia. Vol 2/2.
- [6] Rakic, D., Aki, L & Ori, S. (2013). Shear strength of municipal waste materials from two landfills in Serbia. In book: Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics, pp.347-354. 10.1201/b15004-41.
- [7] Palma, J.H. (1995). Comportamiento Geotécnico de Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos. Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, U. de Cantabria, Santander, España.