

Determinación del coeficiente de permeabilidad de jales en un permeámetro de carga constante y pared flexible

María Elena ACEVEDO VALLE^{a,1} y Osvaldo FLORES CASTRELLÓN^b

^a*Túneles, Instrumentación y Diseño Especializado S.A. de C. V., México*

^b*Instituto de Ingeniería - UNAM, México*

Resumen. La construcción y operación simultánea de los depósitos de jales provoca la variación de los parámetros más importantes de este tipo de suelos, por ejemplo el coeficiente de permeabilidad. El objetivo de este artículo es describir la metodología aplicada para la determinación del coeficiente de permeabilidad de un material proveniente de un depósito de jales (residuos sólidos mineros). Se utilizó un permeámetro de carga constante y pared flexible, instrumentado para medir la condición de esfuerzos de consolidación y el gasto hidráulico en probetas reconstituidas (por el método de compactación por amasado) de 101 mm de diámetro por 50 mm de altura. Se ensayaron probetas en estado suelto y denso, se circuló agua a través de la muestra para expulsar el aire atrapado en la estructura de la muestra. Las muestras se saturaron por contrapresión y se consolidaron a diferentes esfuerzos efectivos. Bajo estas condiciones de esfuerzo se determinó el coeficiente de permeabilidad. Se hace un análisis de la variación de la permeabilidad con la compacidad relativa inicial y los diferentes esfuerzos de consolidación aplicados.

Palabras Clave. Permeabilidad, jales, residuos mineros, permeámetro, compacidad relativa.

1. Introducción

Los jales, llamados en México a los residuos mineros del proceso de molienda, son suelos de comportamiento viscoelástico muy complejo y de alta susceptibilidad a fenómenos como la erosión pluvial, la tubificación y la licuación provocada por un sismo o una explosión [1]. El tamaño de algunos depósitos de jales hace imprescindible evaluar los efectos de las altas presiones de confinamiento en el comportamiento y las propiedades geotécnicas de los materiales granulares que constituyen la presa, tales como permeabilidad, compresibilidad y la resistencia al cortante en arenas [2]. Las propiedades geotécnicas de los jales, al ser materiales artificiales, difieren de las de los suelos naturales, siendo afectadas por varios factores como proceso de beneficio que se utilice en la planta, el transporte en suspensión y la presencia de minerales incorporados [3].

Una de las propiedades más importantes a considerar en el diseño de un depósito de jales es la conductividad hidráulica saturada, la cual tiene influencia en los parámetros

¹ María Elena Acevedo Valle, Calle 7 # 94 Col. San Pedro de los Pinos CP 03800, Ciudad de México, México; E-mail: ma.elena.acevedo@gmail.com, Tel: +52 5534027654

de consolidación, condiciones de flujo de agua a través del dique, la migración de contaminantes al agua subterránea [4].

La determinación del coeficiente de permeabilidad, en el caso de residuos mineros, se complica debido al proceso de sedimentación, consolidación y segregación que se tiene durante la construcción y operación de la presa de jales. Más que ninguna otra propiedad ingenieril de los jales, el coeficiente de permeabilidad es difícil de generalizar, variando entre 5 y más órdenes de magnitud, desde 10^{-2} cm/s para arenas gruesas limpias hasta 10^{-7} cm/s para lodos consolidados. La permeabilidad varía en función de la granulometría, plasticidad, método de colocación y la profundidad del depósito [5].

2. Objetivo

Con la intención de determinar el coeficiente de permeabilidad en jales. Las muestras se ensayaron en un permeámetro de pared flexible y carga constante. Estudiando el efecto de la variación del esfuerzo efectivo de consolidación, compacidad relativa, contenido de agua y porcentaje de finos (%F), en el coeficiente de permeabilidad.

3. Equipo de laboratorio empleado para pruebas de permeabilidad en jales

El equipo consiste en un sistema de válvulas interconectadas que transportan aire a presión transferido a tuberías saturadas con agua destilada y desaireada (Figura 1).

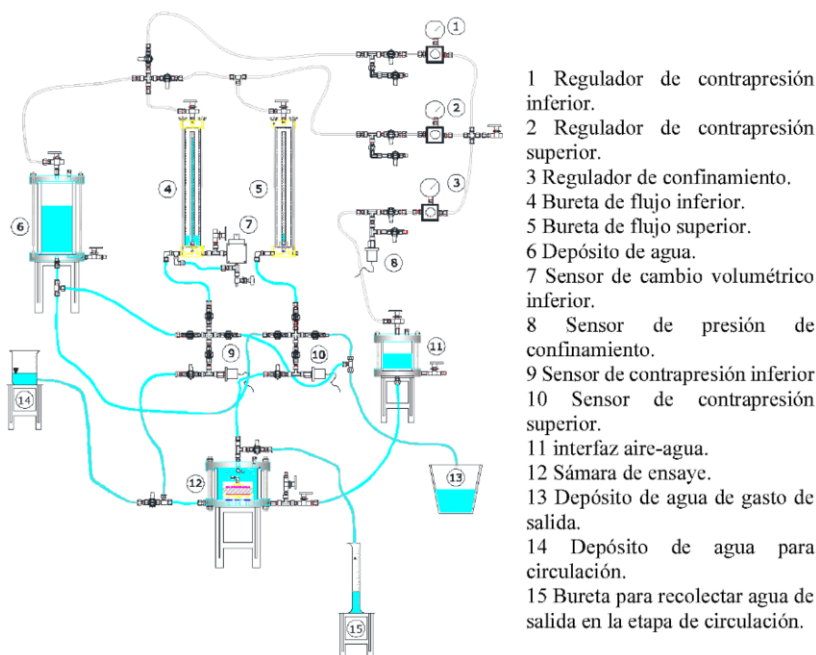


Figura 1. Esquema general del equipo (Permeámetro de carga constante y pared flexible) [6].

El permeámetro de carga constante consta de tres cámaras de acrílico transparente, la cámara principal contiene la probeta de suelo, la cual tiene un diámetro de 4" (101.6 mm) y 50 mm de altura, contenida en una membrana de látex que sólo permite el flujo vertical. La muestra se presuriza al interior de la cámara de montaje por medio de una interfaz agua-aire. El equipo cuenta con dos buretas dobles, que alimentan el flujo interno de la probeta, el caudal hidráulico que circula en las buretas se mide con un sensor de cambio volumétrico y la presión transferida a las líneas saturadas de agua y que saturan la muestra se mide por medio de tres sensores de presión.

4. Procedimiento de ensaye

4.1 Formación de la probeta

Se ensayaron muestras reconstituidas de un material clasificado como SM - Arena limosa (%F=15.1), límite líquido de 30.5% (determinado en cono sueco) y una densidad relativa de sólidos de 2.91, valor dentro del rango de valores de jales mencionados por Vick [5].

La formación de la probeta se realiza por el método de compactación por amasado [7], el método consiste en compactar el material por capas con un pisón el cual cae por peso propio, el esfuerzo de compactación se aplica con movimientos alternados y en posiciones adyacentes.

Preparación del material: El material se seca en el horno para asegurar un contenido de agua inicial de 0%, posteriormente se homogeniza y disgregan los grumos que se hayan formado. Se define el contenido de agua inicial de la probeta y se agrega el agua, simultáneamente se mezcla hasta lograr una muestra homogénea.

Formación de la probeta: La formación de la probeta consiste en compactar el material en 4 capas, utilizando un pisón de 5.4 cm de diámetro. El pedestal (con una piedra porosa) se fija a la mesa de compactación, a éste se le coloca la membrana de látex sujeta con un aro-sello y se fija el molde partido que cuenta con dos conectores por los cuales se aplica vacío dentro del molde para adherir la membrana a éste. Se coloca papel filtro sobre la piedra porosa y se vierte el material correspondiente a la primera capa, el pisón se coloca sobre la superficie del suelo y se deja caer por peso propio, para la densificación del material se realizan 10 apisonadas, distribuyéndolo de manera uniforme en la sección del molde. El mismo método de apisonado se aplica a cada una de las capas de material.

4.2 Montaje de la probeta

Antes de realizar el montaje de la muestra se prepara la cámara para que esté en condiciones de montaje; por lo tanto, se verifica el flujo de agua en las líneas para asegurar que la circulación inicial, la saturación por contrapresión de la probeta y el flujo de agua durante el ensaye esté libre de aire atrapado en las líneas.

Montaje de la probeta: Sin dejar de aplicar vacío, se traslada la muestra a la base de la cámara con el debido cuidado para no afectar la estructura de la probeta. Posteriormente, se pone papel filtro en la parte superior de la muestra y cuidadosamente se coloca el cabezal. En seguida se quita el vacío aplicado y se retira el molde cuidadosamente. Una vez colocada la probeta en el permeámetro se coloca la camisa y cuidadosamente se sitúa la tapa y conecta el cabezal al dren superior. A continuación, se

conecta la tapa al suministro de contrapresión superior y se hace el llenado de la cámara con agua destilada.

Saturación de la probeta: Las probetas ensayadas se formaron en condiciones parcialmente saturadas, con grados de saturación entre 20 y 40%. Para facilitar la saturación se circuló agua destilada y desaireada por el dren inferior y se midió el volumen de agua de entrada. Para generar el flujo de agua se agregó otra línea de salida al dren superior por el que se conduce el flujo a una bureta graduada donde se medía el volumen de agua de salida. Con este par de líneas se produce un flujo de agua con un gradiente hidráulico suficiente para expulsar el aire y que dicho volumen fuera ocupado por agua sin que la estructura de la muestra se vea afectada o se presente arrastre de finos. Una vez que se circuló agua por la probeta se realiza la saturación por contrapresión con incrementos de confinamiento y contrapresión de 0.5 kg/cm^2 , manteniendo un esfuerzo efectivo de 0.1 kg/cm^2 , hasta llegar a un esfuerzo de confinamiento de 3.6 kg/cm^2 y un esfuerzo de contrapresión de 3.5 kg/cm^2 .

Medición de B de Skempton: La verificación del grado de saturación de la probeta se lleva a cabo midiendo el coeficiente B de Skempton. La medición se realiza 24 horas después (en algunas ocasiones 48 horas) de iniciada la saturación. La probeta se consideró saturada cuando el coeficiente B alcanzó un valor igual o mayor a 0.96 [8].

Consolidación: Las etapas de consolidación se inician inmediatamente después de verificar que la probeta está saturada. La muestra fue aislada para ajustar las presiones de confinamiento y contrapresión para aplicar el esfuerzo efectivo deseado. Se aplica el esfuerzo de confinamiento a la probeta, una vez que esta presión es uniforme en la cámara se abre la válvula de drenaje inferior y se inicia el registro de lecturas de la bureta en función del tiempo. La duración de la etapa de consolidación se muestran los resultados en el formato de Taylor y Casagrande; una vez definida la consolidación primaria o hayan transcurrido 24 horas se prosiguió a medir el coeficiente de permeabilidad. Debido a que el ensayo es no destructivo, se aplicó una serie de esfuerzos efectivos ($0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 2.0$ y 2.8 kg/cm^2) entre los cuales se midió el coeficiente de permeabilidad para diferentes cargas hidráulicas.

Medición del coeficiente de permeabilidad: La medición de la conductividad hidráulica se determinó aplicando un flujo ascendente a la muestra. Se establecieron los valores de contrapresión inferior y superior para generar el gradiente hidráulico al que se mediría la permeabilidad. El proceso de medición del coeficiente de permeabilidad se repitió de dos a tres veces, para tres cargas hidráulicas diferentes, esto permitió obtener el valor de k_v cuando el flujo de agua está establecido para cada carga hidráulica, además de permitió observar el cambio de k con la variación de este parámetro

5. Resultados

5.1 Curvas tiempo-permeabilidad

Durante la medición del coeficiente de permeabilidad para un esfuerzo efectivo, se observó a lo largo del tiempo un aparente decremento del valor de k_v , esto se debió a la pérdida de carga hidráulica como resultado de la pérdida de altura de la columna de agua en la bureta de contrapresión inferior, esta pérdida redujo la carga hidráulica en un rango de $0.00 - 0.03 \text{ kg/cm}^2$ ($0 - 30 \text{ cm}$ columna de agua (cm c.a.)). Con la intención de mitigar este efecto, la bureta interna de contrapresión inferior fue sustituida por una bureta de mayor diámetro, mientras que la doble bureta de contrapresión superior fue cambiada

por una única bureta con un diámetro ocho veces mayor; estos cambios permitieron reducir el cambio de altura en las buretas de contrapresión y además permitió un mayor caudal hidráulico.

Con el nuevo sistema de buretas, el registro del coeficiente de permeabilidad a lo largo del tiempo mostró una tendencia casi lineal, congruente con el flujo de agua establecido. Para esfuerzos efectivos de consolidación entre 0.2 y 0.8 kg/cm², la variación del valor de k_v a lo largo del tiempo es mayor que para esfuerzos efectivos más altos (Figura 2).

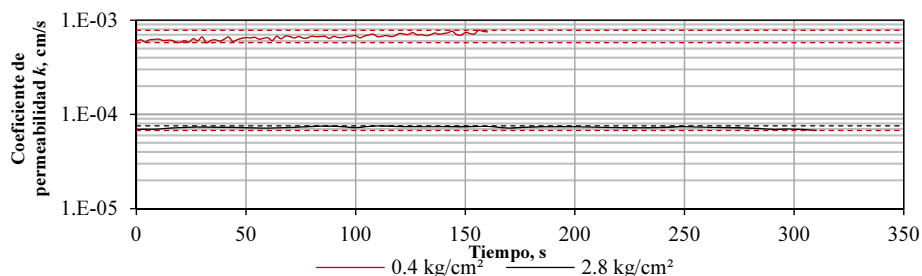


Figura 2. Relación entre resultados consecutivos obtenidos de k para diferentes esfuerzos efectivos de consolidación.

5.2 Curvas tiempo-permeabilidad

Estudios realizados en permeámetros de carga constante y pared rígida, sobre la variación del coeficiente de permeabilidad en función de la carga hidráulica, los resultados muestran que los valores de k_v pueden variar en dos órdenes de magnitud para la misma muestra, en otros casos la variación es apenas perceptible [9].

Para cada esfuerzo de consolidación aplicado se midió la permeabilidad variando la carga hidráulica, incrementándola entre 0.01 y 0.02 kg/cm² (10 – 20 cm c.a.), es decir, entre 10 y 20 cm de carga. La Figura 3 muestra la variación de la permeabilidad medida en una de las muestras ensayadas, se puede observar que en la medida que aumenta la carga hidráulica la variación de la permeabilidad es menor, variando el coeficiente de permeabilidad en menos de 1%, esto puede deberse a un cambio en la estructura de la muestra por el posible arrastre de finos, reflejándose una reducción del valor de k .

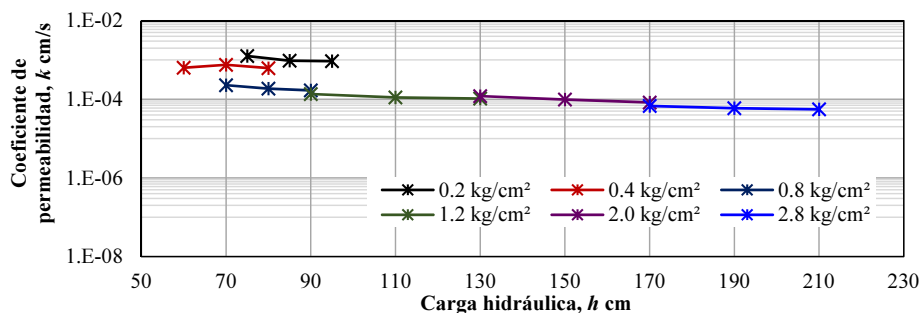


Figura 3. Relación entre la carga hidráulica y el coeficiente de permeabilidad.

5.3 Determinación del coeficiente de permeabilidad

La determinación del coeficiente de permeabilidad de la muestra se obtuvo haciendo una corrección a las dimensiones iniciales de la probeta debido al cambio que presentan por la expulsión de agua en la etapa de consolidación. Se utilizaron las ecuaciones propuestas por Flores (comunicación personal, abril, 2015), en las que interviene el valor del esfuerzo efectivo aplicado, el cambio volumétrico de la probeta y las dimensiones iniciales.

Para cada etapa de consolidación se registraron nueve series de medición con tres cargas hidráulicas distintas, para cada carga se calculó el valor promedio de k , con los cuales se obtuvo un valor medio para el coeficiente de permeabilidad (Figura 4.).

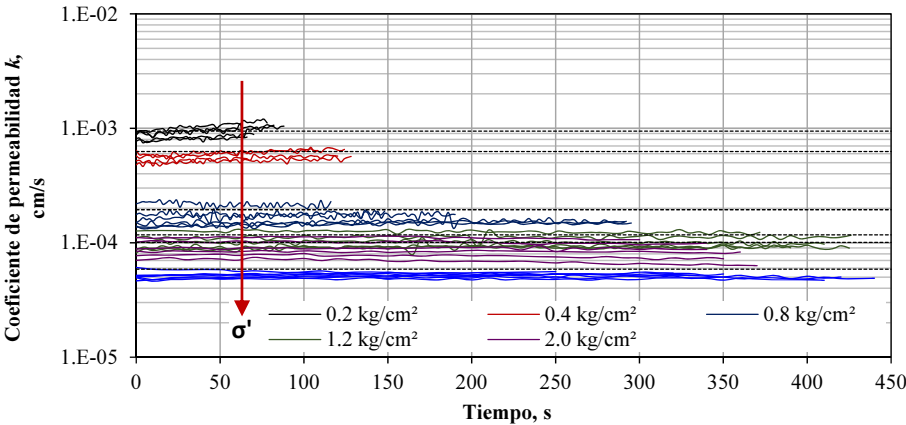


Figura 4. Resultados obtenidos para una prueba en permeámetro de carga constante.

En las Figuras 5 y 6 se muestra la variación del coeficiente de permeabilidad respecto a la relación de vacíos, esfuerzo efectivo, compacidad relativa y compacidad (concentración de sólidos).

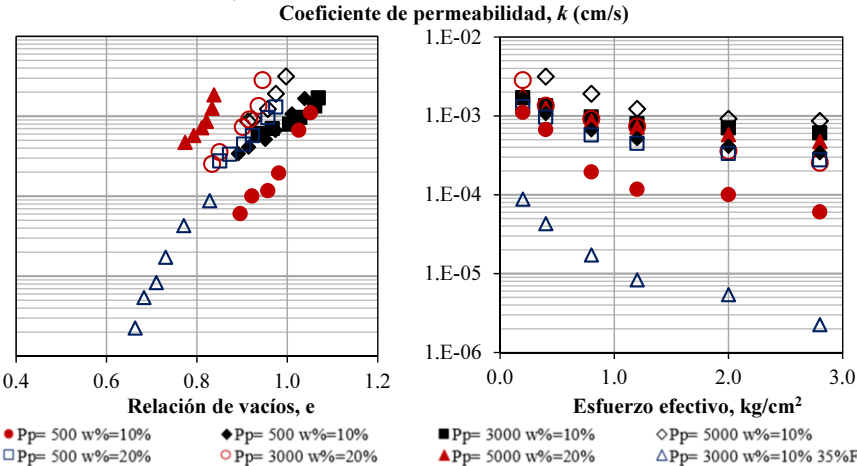


Figura 5. Influencia del esfuerzo efectivo y la relación de vacíos en el coeficiente de permeabilidad.

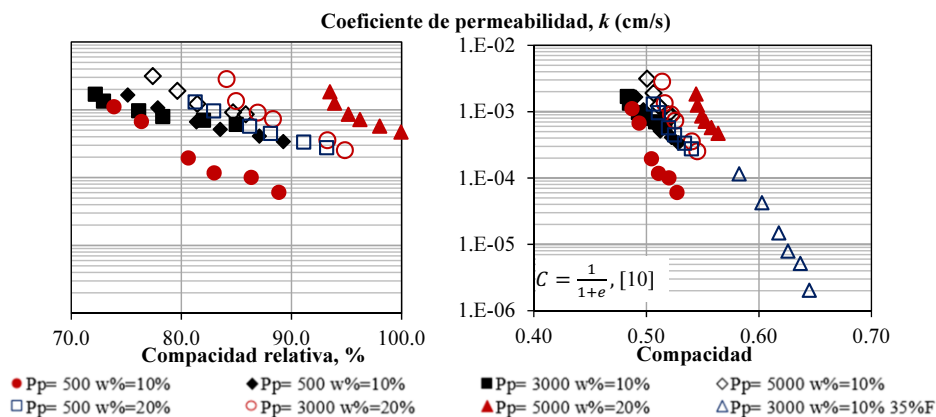


Figura 6. Influencia de la compacidad relativa y compacidad en el coeficiente de permeabilidad.

La densificación de la muestra debido al aumento del esfuerzo efectivo produce el aumento de la compacidad relativa, por lo tanto, la disminución de la permeabilidad de las muestras; sin embargo, no se define un comportamiento claro respecto a las condiciones iniciales de las probetas.

La relación entre el porcentaje de finos y la permeabilidad aun no es muy clara, el coeficiente de permeabilidad de las probetas ensayadas (%F igual al 15%) varía entre $10^{-2} - 10^{-5}$ cm/s mientras que la probeta ensayada con 35% de finos varía entre $10^{-4} - 10^{-5}$ cm/s. Los resultados obtenidos en las pruebas son congruentes con los presentados por otros autores [2]. En la Figura 7 se presentan valores de k para materiales con contenido de finos menores al 30% y mayores a 40%. Los valores observados presentan un rango de k de $10^{-2} - 10^{-5}$ cm/s para jales con porcentaje de finos menor a 30% y para aquellos mayores del 40% se observan valores entre $10^{-6} - 10^{-8}$ cm/s. Esto puede indicar el cambio de la estructura del suelo.

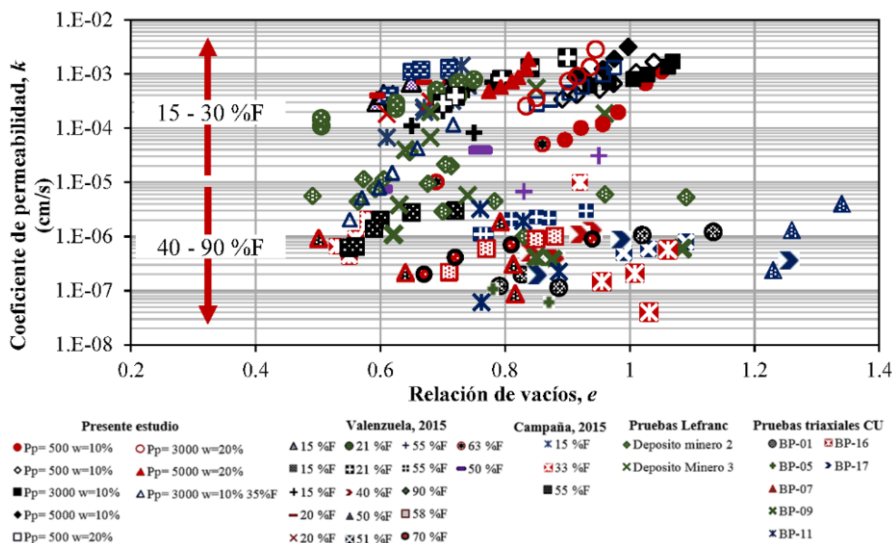


Figura 7. Relación entre la relación de vacíos y el coeficiente de permeabilidad.

6. Conclusiones

En los primeros ensayos realizados se pudo observar que la formación de la probeta, montaje, de saturación y ejecución del ensaye, requiere un procedimiento cuidadoso, al mismo tiempo que se requirió realizar adecuaciones en el equipo.

Las características in situ de los residuos mineros son difíciles de reproducir en laboratorio, debido a los cambios que presentan durante la construcción y operación de las presas de jales. Por esta razón los resultados de laboratorio pueden presentar variaciones con los ensayos realizados en campo.

La relación entre la permeabilidad y compacidad relativa no es muy clara, los resultados obtenidos en este trabajo no muestran un comportamiento general respecto a estas características. La densificación de la muestra por el efecto de la consolidación muestra mayor influencia en los valores de permeabilidad obtenidos, se observa una variación de dos órdenes de magnitud entre las condiciones iniciales y finales de la probeta (valores de k entre $10^{-2} - 10^{-5}$ cm/s para muestras con 15% de finos y compacidad relativa inicial entre 70 y 100%).

El rango de valores del coeficiente de permeabilidad puede definirse en relación con el porcentaje de finos presente en el material, muestras con porcentajes de finos menores al 30% ($10^{-2} - 10^{-5}$ cm/s) y porcentajes mayores a 40% ($10^{-6} - 10^{-8}$ cm/s).

Referencias

- [1] Orozco, R. (2010). *La ingeniería geotécnica en las presas de jales mexicanas*. Memorias de la XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Acapulco – Guerrero, México.
- [2] Valenzuela, L. (2015). “*Tailings dams and hydraulic fills. The 2015 Casagrande Lecture*”, Geotechnical Synergy in Buenos Aires 2015, 5-49.
- [3] Cancela, R. M. (1987). *Comportamiento geotécnico de presas de residuos bajo acciones estáticas y dinámicas*. Tesis que para obtener el grado de Doctor Ingeniero de caminos, canales y puertos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.
- [4] Bussiére, B. (2004). “Colloquium 2004: Hydrogeotechnical Properties of Hard Rock Railings from Metal Mines and Emerging Geoenvironmental Disposal Approaches.” Canadian Geotechnical Journal, 44 (9), 1019-1052.
- [5] Vick, S.G. (1990). *Planning, Design and Analysis of Tailings Dams*. BiTech Publishers Ltd.
- [6] Acevedo, M. (2017). “Influencia de la compacidad relativa en el coeficiente de permeabilidad de jales”. *Tesis que para obtener el grado de Maestra en Ingeniería*. División de estudios de posgrado Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Mexico City, México.
- [7] Flores, O. (2008). *Módulo de rigidez y relación de poisson dinámicos obtenidos en la franja del tercio medio en probetas de suelo granular*. Tesis para optar al grado de Doctor en Ingeniería. División de estudios de posgrado. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F., México.
- [8] ASTM D 4767-11. “Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils”. 2011
- [9] Kaoser, S.; Barrington S., Elektorowicz, M. & Ayadat, T. (2006). “The influence of hydraulic gradient and rate of erosion on hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures”. McGill University, Canada.
- [10] Orozco, R.V. (1978). “*Control de calidad*” IX Reunión Nacional de Mecánica de suelos, Mérida, México
- [11] Flores, O. (1996). *Propiedades dinámicas de jales*. Tesis para optar al grado de Maestro en Ingeniería (Mecánica de Suelos). División de estudios de posgrado Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México - UNAM. Mexico DF. México.