

ENSAYOS DE PERMEABILIDAD EN MATERIALES DE BAJA DE PERMEABILIDAD COMPACTADOS

Yngrid Alarcón Bárcena ⁽¹⁾

Jorge E. Alva Hurtado ⁽²⁾

1. INTRODUCCION

La necesidad de almacenar volúmenes importantes de agua o de otros líquidos con fines de desarrollo urbano, industrial y/o agrícola, obliga al hombre a construir con mayor frecuencia lagunas artificiales de grandes dimensiones. El diseño y la construcción de estas estructuras hidráulicas muchas veces presentan problemas específicos que hacen que la tecnología usual de las presas no resulte directamente aplicable en todos sus aspectos.

Es común que en las lagunas artificiales se almacene un producto escaso, contaminante o de alto valor económico, por lo que reviste una especial importancia el control de las filtraciones. Esto ha dado lugar, principalmente en los últimos años, al desarrollo de nuevas técnicas de impermeabilización, como también la innovación de nuevos equipos de permeabilidad, los que permitirán obtener valores más cercanos a la realidad y por ende brindar un óptimo diseño y construcción de estas importantes estructuras hidráulicas.

1.1 Generalidades

1.1.1 Objetivo

La finalidad del presente reporte, es determinar valores de conductividad hidráulica de materiales finos saturados para la construcción de pantallas impermeables en diques de tierra. Con el presente estudio se busca optimizar el tiempo destinado a la saturación de suelos finos, utilizando para ello un permeámetro de pared flexible. Además se describe la norma de ensayo ASTM D 5084-90 y se presentan resultados de los ensayos de permeabilidad en muestras de los diques de las lagunas de oxidación de Cortijo y Covicorti ubicadas en la ciudad de Trujillo, así como también del cuerpo de la presa Pomacocha del proyecto Marca II, realizados en el Laboratorio Geotécnico del CISMID.

⁽¹⁾ Ingeniera Civil-Universidad Ricardo Palma, Lima Perú

⁽²⁾ Profesor Principal, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima Perú

1.2 Algunos Aspectos de la Tecnología de la Impermeabilización con Suelos Compactados

1.2.1 Consideraciones Generales

Un revestimiento de suelo debe combinar generalmente varias propiedades:

- Baja permeabilidad
- Estabilidad ante los gradientes fuertes a los que se encuentra sometido
- Resistencia a la erosión
- Gran estabilidad volumétrica

1.2.2 Selección de Material

En la referencia 5 se puede encontrar una clasificación de los diferentes suelos de acuerdo a sus propiedades más relevantes, desde el punto de vista de su uso como revestimiento. Existen dos opciones: emplear un material fino plástico poco permeable y protegerlo con otro material contra la erosión y secado o elegir un material natural (o una mezcla) que combine en la medida de lo posible todas las propiedades deseables.

El espesor del revestimiento debe ser el necesario para garantizar la continuidad del mismo y así evitar que se encuentre sometido a un gradiente hidráulico excesivo: (no es recomendable utilizar un espesor inferior a 30 cm. ni un gradiente superior a 10), especialmente en materiales mal graduados. Es importante verificar que las diferentes fracciones granulométricas que componen el material de revestimiento cumplan mutuamente con las condiciones de retención de filtros y que no existe peligro de segregación bajo el efecto del gradiente hidráulico. En la misma forma, el substrato debe poder retener las partículas del revestimiento.

1.2.3 Preparación del Material

Por los motivos expuestos en 1.2.1, es conveniente compactar el material seleccionado con un contenido de humedad alto para reducir su permeabilidad al mínimo; el contenido de humedad requerido puede ser hasta de 5 o 6% superior al óptimo Proctor. Para evitar que existan zonas locales más permeables en el revestimiento, es necesario que los materiales de los bancos de préstamo sea preparados previamente para su colocación. La preparación consiste en darles el contenido de humedad adecuado, homogenizarlos por mezclado, y dejarlos curar para que el contenido de humedad se uniformice por difusión. El tiempo de curado debe fijarse para cada material mediante muestreos de control. Un tiempo del orden de tres a seis días resulta generalmente suficiente.

1.2.4 Colocación

Si se pretende lograr la mínima permeabilidad, los equipos tradicionales de compactación como rodillos pata de cabra o neumáticos pueden resultar inadecuados al atascarse debido al alto contenido de humedad del material.

Teniendo en cuenta que no se busca un alto grado de compactación, sino dar al suelo una estructura adecuada, puede ser preferible recurrir a un equipo ligero (por ejemplo tractor agrícola) para la formación de una capa de suelo remoldeado de espesor uniforme. Es conveniente que el revestimiento se construya por capas de no más de 20 cm de espesor.

1.2.5 Protección

La protección de los revestimientos de suelos finos, a base de material granular, suelo-cemento o concreto asfáltico, debe instalarse lo más rápido posible. Durante el lapsa que separa la colocación del revestimiento de la instalación de la protección, el contenido de humedad del suelo debe mantenerse constante por riego.

1.3 Evaluación de la Necesidad de Impermeabilización

Antes de decidir si una laguna se ha de impermeabilizar o nó, es muy importante realizar un estudio cuidadoso y básicamente la decisión dependerá de la magnitud de las filtraciones previsibles, del tipo de líquido almacenado y de consideraciones económicas y ecológicas.

1.3.1 Mecanismos del Filtración

1.3.2.1 Estudio Teórico de las Infiltraciones

Las pérdidas de agua por infiltración hacia el subsuelo en condiciones de flujo establecido para almacenamientos superficiales están regidas por las ecuaciones de flujo en medios porosos. En cualquier punto del suelo a través del cual ocurre el flujo se cumple la ecuación diferencial de Laplace:

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Donde:

k_x, k_y, k_z = coeficientes de permeabilidad en las direcciones X, Y, y Z, respectivamente

h = carga hidráulica total

Dependiendo de las condiciones de frontera prevalecientes, la ecuación diferencial anterior corresponderá a diversos mecanismos de filtración.

1.3.1.2 Mecanismos de Filtración

Además de presentarse a través de los mecanismos descritos anteriormente, las filtraciones pueden ocurrir debido a diversas condiciones peculiares del sitio o a defectos de los bordos o de su cimentación.

- * Oquedades o grietas en el suelo de desplante
- * Agrietamiento por secado de materiales arcillosos superficiales
- * Fracturamiento hidráulico del subsuelo en caso de terrenos muy blandos
- * Contacto defectuosos entre los bordos y suelo de desplante
- * Contacto defectuoso entre capas compactadas de los bordos

1.3.2 Estudios Geotécnicos

1.3.2.1 Consideraciones Generales

Antes de decidir respecto a la conveniencia de impermeabilizar una laguna artificial, es necesario realizar un estudio geotécnico detallado del sitio, con los objetivos siguientes:

- * Identificar los mecanismos más probables de filtración
- * Verificar si la permeabilidad del terreno conduce a filtraciones aceptables o nó
- * Evaluar si los suelos locales pueden ser empleados para impermeabilizar, o definir los problemas de estabilidad que estos suelos plantearán para la aplicación de un método de impermeabilización dado.

La investigación geotécnica debe, además, proporcionar los elementos para el diseño del bordo, características mecánicas de la cimentación y de los materiales de construcción.

1.3.2.2 Exploración y Pruebas de Campo

- a) Exploración Superficial y Recopilación de Datos Locales
- b) Sondeos
- c) Pruebas de Permeabilidad de Campo

1.3.2.3 Ensayos de Laboratorio

- a) Pruebas de Identificación
- b) Pruebas de Permeabilidad
- c) Pruebas de Consolidación
- d) Pruebas de Resistencia al Corte
- e) Prueba de Erosionabilidad

2. METODOS PARA LA MEDICION DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DEL SUELO

Existen varios procedimientos para la determinación de la permeabilidad de los suelos, unos "directos", así llamados por que se basan en pruebas cuyo objetivo fundamental es la medición de tal coeficiente; otros "indirectos", proporcionados en

forma secundaria, por pruebas técnicas que primariamente persiguen otros fines. También se revisará algunas fórmulas de las propiedades hidráulicas de los suelos, se definirá en qué consiste el flujo de agua, el coeficiente de permeabilidad, la velocidad y presión de filtración. Además se presentará un caso muy importante sobre filtración en lagunas del Ingeniero Pedro Ortigosa.

2.1 Flujo de Agua

Puesto que los suelos constan de partículas discretas, los poros entre las partículas están interconectados, por lo que el agua puede fluir libremente en el interior de la masa del suelo. En medios porosos como este, el agua fluye de las zonas de alta a las de baja presión. Al estudiar los problemas del flujo de agua, es común expresar la presión como carga de presión o carga, medida en metros de agua. La ecuación de Bernoulli incluye tres componentes de la carga cuya suma produce la carga total (H) que causa el flujo de agua.

$$H = h_z + \frac{u}{r_w} + \frac{v^2}{2g}$$

Donde :

- h_z = carga de posición o de elevación
- u / γ_w = carga de presión debida a la presión de poro u
- $v^2 / 2g$ = carga de velocidad cuando la velocidad de flujo es v

En condiciones de saturación, el flujo unidimensional está gobernado por la ley de Darcy (referencias 1, 2 y 3).

$$Q = K \cdot A \cdot i$$

Donde :

- Q = gasto (cm³/seg)
- K = coeficiente de permeabilidad
- A = área total de la sección
- i = gradiente hidráulico

2.2 Coeficiente de Permeabilidad

2.2.1 Definición

Se entiende por permeabilidad a la facilidad de movimiento de un flujo a través de un medio poroso. La permeabilidad puede definirse como velocidad de flujo producida por un gradiente hidráulico unitario. El valor del coeficiente de permeabilidad (k) se usa como una medida de resistencia al flujo ofrecida por el suelo.

La permeabilidad se ve afectada por diversos factores inherentes tanto al suelo como a las características del agua circulante. Los factores principales son:

- a) La densidad del suelo
- b) La relación de vacíos del suelo
- c) La estructura y estratificación del suelo
- d) La existencia de agujeros, fisuras, etc., en el suelo
- e) La viscosidad del agua del suelo, que varía con la temperatura

El intervalo de los valores del coeficiente de permeabilidad (k) es muy amplio y se extiende desde 10^5 cm/s para las gravas de granos muy gruesos, hasta un valor insignificante en el caso de arcillas. La Tabla 2.1 muestra el intervalo de valores promedio de k para diversos suelos, incluyendo las condiciones de drenaje potencial.

TABLA 2.1
Intervalos de Valores de K (cm/seg)

10^2		
10^1		
10^0	Gravas limpias	Muy buen drenaje
10^{-1}		
10^{-2}		
10^{-3}	Arenas limpias	Buen drenaje
10^{-4}	Mezclas grava-arena (arcillas fisuradas y alteradas)	
10^{-5}	Arenas muy finas	
10^{-6}	Limos y arenas limosas	
10^{-7}		Mal drenaje
10^{-8}	Limos arcillosos (>20% arcilla)	
10^{-9}		
	Arcillas sin fisuras	Prácticamente impermeable

2.3 Velocidad y Presión de Filtración

La infiltración se define como el movimiento del agua a través de una masa de suelo. Microscópicamente, el agua fluye formando una ruta sinuosa a través de los vacíos del suelo; pero sin embargo para fines prácticos se asume que sigue un curso en línea recta. En la ecuación de Darcy, la velocidad v es considerada como una velocidad aparente o superficial, la velocidad de flujo con respecto a una sección del suelo de área A . La velocidad real a través de los poros será mayor, y a ésta se le llama velocidad de infiltración (V_s) (referencia 3).

2.4 Métodos Directos

2.4.1 Prueba de Carga Constante

La prueba de carga constante, se usa para determinar coeficientes de permeabilidad de suelos de granos gruesos, tales como gravas y arenas con valores de k mayores a 10 m/seg.

El aparato usado recibe el nombre de permeámetro de carga constante. La muestra de suelo se introduce en un cilindro de plástico transparente de metacrilato de metilo con filtros de malla de alambre y grava por encima y por debajo. En la pared lateral del cilindro existen varios puntos de conexión de manómetros para tomar diferentes lecturas de pares de cargas de presión. El agua que fluye a través de la muestra proviene de un tanque o depósito diseñado para mantener una carga constante, y la cantidad de agua se mide pesando el recipiente recolector.

Puesto que la presencia de burbujas de aire puede afectar mucho los resultados, es imperativo asegurarse que el aire se haya eliminado del sistema en la medida de lo posible. Esto se lleva a cabo por una parte, suministrando agua desaireada al tanque y por la otra, aplicando un vacío a la muestra antes de iniciar la prueba. El flujo se continúa hasta lograr un estado estable o de flujo establecido, esto es, hasta que los niveles en los tubos de los manómetros sean constantes. Una vez que se ha alcanzado el estado estable, se mide la cantidad que fluye durante un tiempo dado y se registran las lecturas de los dos niveles manométricos. Después se modifica la velocidad de flujo y se repite el procedimiento. Se debe efectuar varias pruebas con velocidades para establecer el valor promedio de k (el cual se determina aplicando la Ley de Darcy).

2.4.2 Prueba de Carga Variable

La prueba de carga variable se usa para determinar el coeficiente de permeabilidad de suelos finos, tales como arenas finas, limos y arcillas. Para estos suelos, el flujo de agua que los atraviesa es demasiado pequeño para permitir mediciones precisas con el permeámetro de carga constante.

En un cilindro de 100 mm de diámetro (generalmente) se introduce una muestra del suelo; si la muestra que se va a ensayar es inalterada el cilindro puede ser un tubo U100 de muestreo, o bien el tubo cortanúcleos que se usa en los ensayos de densidad de campo. Las muestras también pueden prepararse por compactación en un molde de compactación estándar. Los extremos superior e inferior de la muestra se protegen con un filtro de malla de alambre y grava. La base del cilindro queda sumergida en un recipiente con agua que cuenta con un vertedor de nivel constante, y el extremo superior se conecta a un tubo piezométrico abierto de diámetro conocido.

La prueba se lleva a cabo llenando la columna con agua desaireada y permitiendo que se produzca la infiltración a través de la muestra. Se registra la altura de agua en la columna a diferentes tiempos durante la prueba, y ésta se repite con tubos piezométricos de diferente diámetro.

2.4.3 Prueba In Situ

Debido a los problemas asociados con la confiabilidad de las pruebas de laboratorio, se deben emplear métodos de campo cuando los valores de permeabilidad tengan gran importancia.

2.5 Método Indirecto

2.5.1 Cálculo de la Prueba Horizontal de Capilaridad

Debido a las fuerzas capilares, el agua que penetra en un suelo seco avanza con cierta velocidad, en función de la cual se puede determinar indirectamente la permeabilidad del suelo. Esta prueba es adecuada especialmente para ensayar con rapidez un gran número de muestras en el campo. Se usa cuando los materiales tienen una permeabilidad comprendida entre 10^{-1} y 10^{-5} cm/seg.

2.6 Filtración de Agua a través del fondo de Lagunas de Estabilización

Las lagunas primaria y secundada, están destinadas al tratamiento de aguas servidas. Estas se construyeron excavando la superficie de un depósito de arcilla, lo que permitió compactar en capas el material removido para la formación de los muros. El proyecto especificó la colocación en el fondo de las lagunas, una carpeta compactada de 25 cm de espesor y se hizo uso de la arcilla de excavación. Sin embargo, al contar con un espesor residual de 1.0 m de arcilla CL (horizonte H-1).

Tabla 2.2
Permeabilidad del Horizonte de Arcilla CL

Laguna	Coeficiente de Permeabilidad (cm/seg)	La Prueba de Vaciado arcilla natural	
		n = 5	n = 10
	Probeta compactada en Laboratorio		
Primaria	$4 \times E 10^{-7}$	$1.8 \times E 10^{-4}$	$1.6 \times E 10^{-4}$
Secundaria	$4 \times E 10^{-7}$	$2.3 \times E 10^{-4}$	$2.0 \times E 10^{-4}$

n = razón entre la permeabilidad de la arcilla CL-ML y la permeabilidad de la arcilla CL. de acuerdo a los ensayos de laboratorio se adoptó n = 10.

más 1.3 m de arcilla CL-ML (horizonte H-2), el contratista decidió eliminar la carpeta de arcilla compactada especificada por el proyecto. Esta decisión quedó reforzada por ensayos de permeabilidad en laboratorio sobre probetas compactadas, las que arrojaron valores en el rango de 4×10^{-7} cm/seg a 4×10^{-6} cm/seg para la arcilla CL y la arcilla CL-ML respectivamente (Ver Tabla 2.2⁵). Al efectuar el primer llenado de

prueba con agua, hasta alcanzar el nivel de operación de las lagunas, se constató una velocidad de vaciado muy superior a la esperada. Ello condujo a asignar nuevos valores de permeabilidad a los horizontes arcillosos, con la finalidad de reproducir las curvas de vaciado. Este análisis retrospectivo generó valores del coeficiente de permeabilidad muy superiores a los obtenidos en los ensayos de laboratorio con probetas compactadas. Por otra parte, el gasto de filtración medido fue del orden de 13 lts/seg, cifra inadmisibles ya que resultó similar al gasto de alimentación de las lagunas con aguas servidas, impidiendo con ello el proceso de purificación.

Solución Planteada:

Se le expuso al cliente y al contratista que la existencia de un depósito de arcilla natural como el del problema analizado, no constituía de por sí una garantía de impermeabilización, ya que la permeabilidad del depósito arcilloso dependía, entre otras cosas, de la estructura de sus partículas, lo que indica que una arcilla compactada en el laboratorio con humedad óptima tiende a generar una estructura dispersa, entregando coeficientes de permeabilidad bajos (por ejemplo un coeficiente de 4×10^{-7} cm/seg. como el medido para la arcilla CL compactada en el laboratorio). En contraposición a la misma arcilla en estado natural, que puede presentar una estructura flocuada e incluso con micro y macro poros, lo que genera permeabilidades mucho más altas.

En base a lo anterior se materializó la carpeta especificada en el proyecto, para cuyo efecto se escarpó la arcilla CL del fondo de las lagunas en un espesor de 25 cm. El sello del escarpe se compactó con una humedad entre la óptima y +2% aplicando 8 pasadas de rodillo pata de cabra. Seguidamente se colocó la arcilla proveniente del escarpe, la que se compactó en 2 capas con 8 pasadas de rodillo pata de cabra por capa utilizando una humedad entre la óptima y +2%. Se estableció una compactación del 93% del Proctor Modificado como mínimo. El coeficiente de permeabilidad medido en el laboratorio en muestras no perturbadas extraídas de la carpeta así compactada quedó comprendido entre 1.1×10^{-6} a 1.7×10^{-6} cm/seg., rango que, como era de esperar, es muy inferior a la permeabilidad de la arcilla CL en estado natural. Con los coeficientes de permeabilidad para los horizontes arcillosos en estado natural (ver Tabla 2.2), se determinó la permeabilidad de la carpeta compactada para reproducir los resultados de la segunda prueba de vaciado, obteniéndose valores en el rango 1.8×10^{-6} a 3.1×10^{-6} cm/seg. Este rango resultó consistente con la permeabilidad de laboratorio obtenida para las muestras no perturbadas extraídas de la carpeta.

Conclusión:

Como consecuencia de colocar la carpeta compactada, la segunda prueba de vaciado entregó un gasto de filtración para el nivel de operación de las lagunas igual a 3 lts/seg., cifra que se consideró admisible ya que permitía el proceso de purificación y la formación de la película impermeable.

3.0 EQUIPO DE PERMEABILIDAD

El coeficiente de permeabilidad k puede determinarse en el laboratorio entre otros, haciendo uso de los equipos de permeabilidad de pared rígida y de pared flexible, los que se describen a continuación:

3.1 Equipo de Permeabilidad de Pared Rígida

Este permeámetro se utiliza para suelos relativamente permeables, tales como gravas, arenas y mezclas de arena y grava. Los coeficientes de permeabilidad para esta clase de suelos varían de 10^2 a 10^{-3} cm/seg. El procedimiento consiste en someterá la muestra de suelo (previamente compactada), a un flujo de agua bajo una carga constante. Es necesario conocer el área de la sección transversal de la muestra, su longitud, la carga a la que está sometida la muestra (por lo general es 1 kg/cm^2) y la temperatura del agua.

3.2 Equipo de Permeabilidad de Pared Flexible

Se presenta el permeámetro de pared flexible, que mide la conductividad hidráulica para suelos finos, tanto para las muestras inalteradas como compactadas (remoldeadas), cuya principal ventaja es la saturación de los suelos finos. Realiza ensayos de conductividad hidráulica a un nivel controlado de esfuerzos efectivos, además el equipo de permeabilidad de pared flexible es capaz de aplicar contrapresión y por lo tanto optimizar el tiempo de saturación del espécimen.

3.2.1 Procedimiento

Para realizar el ensayo de permeabilidad utilizando un Permeámetro de Pared Flexible se siguen los siguientes pasos:

- a) Preparación del Equipo
- b) Preparación de la Muestra
La preparación de la muestra defiere según sea ésta: inalterada o remoldeada (compactada)
- c) Presión de Confinamiento y Saturación de la Muestra.

La norma de ensayo ASTM D 5084-90 recomienda hacer uso de la Tabla 3.1 donde se recomienda valores de gradientes hidráulicas máximas según las conductividades hidráulicas del material

TABLA 3.1

Conductividad Hidráulica (cm/s)	Gradiente Hidráulica Máxima Recomendada
1×10^{-3} a 1×10^{-4}	2
1×10^{-4} a 1×10^{-5}	5
1×10^{-5} a 1×10^{-6}	10
1×10^{-6} a 1×10^{-7}	20

d) Medición de la Conductividad hidráulica

Para calcular la conductividad hidráulica k , o el coeficiente de permeabilidad, en ensayos de carga constante y velocidad de flujo constante, se aplica la siguiente fórmula:

$$k = \frac{Q.L}{A.t.h} \quad (3.1)$$

Donde:

k = conductividad hidráulica

Q = cantidad de flujo

L = longitud de la muestra

A = área transversal de la muestra

t = intervalo de tiempo

h = diferencia de carga hidráulica (expresada en columna de agua)

4.0 ENSAYOS DE LABORATORIO

4.1 Determinación de k en el Laboratorio

El coeficiente de permeabilidad (k), puede medirse mediante ensayos de campo o de laboratorio y los principales problemas relacionados a la confiabilidad de las pruebas de laboratorio están relacionadas son:

1. La obtención de buenas muestras representativas
2. La reproducción de las mediciones de laboratorio
3. La reproducción de las condiciones de campo

4.1.1 Confiabilidad de la Muestra

La permeabilidad de una masa de suelo depende tanto de su microestructura como de su macroestructura. Para realizar los ensayos de laboratorio las muestras que se obtienen por lo general son de tamaño bastante pequeño, por consiguiente, poco probable de que sean satisfactoriamente representativas en suelos con características macroestructurales importantes. Esta deficiencia puede corregirse hasta cierto punto con grupos selectos de muestras seleccionadas con mucho cuidado.

4.1.2 Confiabilidad de las Mediciones de Laboratorio

La finalidad de cualquier procedimiento de laboratorio consiste en reproducir resultados similares usando un mismo método, y que estos resultados se comparen favorablemente con los obtenidos mediante otros procedimientos.

4.1.3 Reproducción de las Condiciones de Campo

Por lo general, es difícil obtener muestras inalteradas, y es más difícil aún simular en el laboratorio las condiciones reales de campo en cuanto al flujo y esfuerzo. Los ensayos de laboratorio deben complementarse, siempre que sea posible y apropiado, con pruebas de campo. Puesto que el intervalo de valores de k es tan amplio, la selección del método y el equipo depende del tipo de suelo. Los tipos de ensayo más comunes en la actualidad son:

- a) Prueba de Carga Constante
- b) Prueba de Carga Variable

4.2 Descripción de Materiales Ensayados

Se realizaron ensayos de permeabilidad (método de carga constante) usando un permeámetro de pared flexible de los siguientes materiales:

A. Lagunas de Oxidación Cortijo y Covicorti

Ubicación de Area de Estudio

El área de estudio se ubica en los alrededores de la ciudad de Trujillo. El terreno de la laguna Cortijo se ubica hacia el nor-oeste de la ciudad en la hacienda del mismo nombre, con un área de aproximadamente 7 hectáreas; la laguna Covicorti se ubica hacia el sur-oeste de Trujillo, entre las urbanizaciones San Andrés 5ta etapa y Los Rosales, con un área de aproximadamente 21 hectáreas.

Características Geológicas

La Ciudad de Trujillo está ubicada dentro de la unidad geomorfológica denominada "Pampa Costanera", la que se desarrolla sobre una faja paralela a la costa, desde el nivel del mar hasta una altitud de 200 metros. Por el Oeste está limitada por pequeñas escarpas que bordean el litoral y por el Este por las cadenas de cerros bajos de los primeros contrafuertes andinos. En conjunto se trata de una llanura aluvial, que está surcada por los cauces de ríos y quebradas secas.

B. Presa Pomacocha

Geología de la Presa

La presa de Pomacocha existente cierra la Laguna Pomacocha a una altitud de 4260 m.s.n.m. Aquí se proyectó la construcción de una presa nueva de tierra con una altura de 44 metros, cuyo eje está ubicado al pie de la presa antigua. En la zona de la presa se observan las características geológicas siguientes:

En el estribo derecho aflora una secuencia estratigráfica de calizas beige en capas medianas a gruesas de 50 cm a 1.20 m, con algunas intercalaciones de calizas margosas y concrecionadas, fosilíferas que corresponden a la Formación Chulec del Cretáceo Inferior con posición N25° O / 70° SO.

La Formación Chulec, comprende los siguientes elementos de abajo hacia arriba: arcillas calcáreas de color gris oscuro, lodolitas calcáreas arcillosas grises con presencia de fósiles, limolitas calcáreas y wackstones bioturbados con fósiles pelágicos y bénticos, packstones bioclásticos con algunos fósiles (enteros y rotos) bénticos (gastrópodos, equinodermos y ostras. grainstones oolíticos con bioclastos y algunos litoclastos).

4.3 Evaluación de Resultados

4.3.1 Lagunas de Oxidación Cortijo y Covicorti

Con las muestras obtenidas de las calicatas y los sondajes, se realizaron ensayos estándar y adicionalmente a los ensayos de clasificación se ejecutaron ensayos especiales como compactación y permeabilidad.

Los ensayos de Compactación Proctor Estándar indican una máxima densidad seca de 1.862 a 1.902 gr/cm³ y un óptimo contenido de humedad de 12.9% a 13.29%. Los ensayos de permeabilidad para el material arcilloso indican valores de 1.22 x10⁻⁷ cm/seg. para la laguna Cortijo y 1.32 x 10⁻⁷ cm/seg. para Covicorti.

4.3.2 Presa Pomacocha

Las muestras ensayadas corresponden a la cantera principal, la que pertenece a un material morrénico, que será utilizado como cuerpo de la presa Pomacocha. Los ensayos de laboratorio en la cantera principal, corresponden a las muestras obtenidas de las 14 calicatas dispuestas en dicha área. El resumen de las características principales de los ensayos realizados se presenta en la Tabla 4.1.

En relación a la compactación, se realizaron ensayos de compactación Próctor Estándar para determinar la máxima densidad seca y el óptimo contenido de humedad. Estas compactaciones se realizaron con especímenes compactados al 100% del ensayo Próctor Estándar.

5.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

* El método de ensayo utilizado es aplicable para un flujo laminar y unidimensional dentro de los materiales porosos.

- * El método de ensayo proporciona un medio para determinar la conductividad hidráulica a un nivel de esfuerzos efectivos.
- * La saturación será verificada hallando el parámetro B, el que deberá ser mayor o igual al 95%.
- * Las presiones de filtración asociadas a grandes gradientes hidráulicas, pueden consolidar muestras blandas y compresibles y además reducir su conductividad hidráulica.
- * La ventaja más importante es la optimización del tiempo de saturación para muestras de suelos finos impermeables.
- * La Tabla 4.2 resume los valores de la conductividad hidráulica de los materiales ensayados.
- * En los materiales ensayados, tanto para las Lagunas de Oxidación (Cortijo - Covicorti) y para el cuerpo de la Presa Pomacocha se llegaron a obtener grados de saturación que fluctúan entre el 95-100%.
- * Los materiales fueron compactados al 100% del Proctor Estándar.
- * Se espera con este trabajo iniciar un nuevo campo de investigación sobre el comportamiento hidráulico de los materiales finos, utilizando para ello nuevos equipos de laboratorio y de esta manera caminar en paralelo con el avance tecnológico.

5.2 Recomendaciones

- * Se recomienda usar agua desaireada, para minimizar el potencial de difusión del aire a través de la membrana dentro de la muestra.
- * Se recomienda usar la Tabla 3.1 para el uso del gradiente hidráulico según el tipo de muestra a ensayar.
- * Deberá utilizarse un equipo adecuado para la compactación.
- * Se recomienda tamizar la muestra por la malla N°4, debido a que las partículas mayores a ésta, pueden dañar la membrana de látex.
- * Se recomienda antes de realizar el ensayo, la verificación de las válvulas, las que deberán estar cerradas; además que el tanque y las buretas sean llenadas hasta un nivel adecuado.
- * Se recomienda antes de realizar el ensayo, la eliminación de las burbujas de aire del tanque de agua y las buretas por unos 30 minutos.
- * Al momento de llenar la celda con agua, hacerlo a una velocidad tal que no queden atrapadas las burbujas de aire. En caso contrario eliminar la mayor cantidad de burbujas.
- * Para disminuir de una manera eficiente la permeabilidad se recomienda darle al suelo una estructura adecuada antes que tratar de disminuir su porosidad.

REFERENCIAS

- 1) Lambe, T.W. y Whitman R.V., "Mecánica de Suelos", Ed. Limusa, 1972
- 2) Alva Hurtado, J. E., "Un Aparato para Realizar Ensayos de Permeabilidad y de Fractura Hidráulica en el Campo", IV Congreso Nacional de Ingeniería Civil-Chiclayo-Perú, 1982
- 3) Das, B. M., "Advanced Soil Mechanics", Ed. Mc Graw Hill, New York, 1985
- 4) Alva Hurtado, J. E. y Canchán F. "Factores de Forma en Piezómetros", VI Congreso Nacional de Ingeniería Civil-Cajamarca - Perú, 1986
- 5) Auvinet G. y Esquivel R, " Impermeabilización de Lagunas Artificiales", Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Ed. Limusa. México, 1986.
- 6) Juarez Badillo E. y Rico Rodriguez A., "Mecánica de Suelos", Ed. Limusa, México, 3ra Edición, 1986
- 7) "Mecánica de Suelos", Instructivo para Ensayos de Suelos, Colección Brevarios del Agua, México, 1990
- 8) Whitlow R., "Fundamentos de Mecánica de Suelos", CECSA, 1994
- 9) Ortigosa P., "La Ingeniería Geotécnica en el Control Ambiental", X Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones. Guadalajara, México, 1995

TABLA 4.1
RESUMEN DE LOS ENSAYOS DEL LABORATORIO

CANTERA O SONDAJE	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5	CP-6	CANTERA	CANTERA
PROYECTO	MARCA II	MARCA II	MARCA II	MARCA II	MARCA II	MARCA II	CORTIJO	COVICORTI
ESTADO	Remoldeado	Remoldeado	Remoldeado	Remoldeado	Remoldeado	Remoldeado	Remoldeado	Remoldeado
CLASIFICACION (SUCS)	GC	CL	GC	GC	GC	GC	SC	SC
CONTRAPRESION (Kg/cm ²)	2.81	2.81	2.95	2.81	2.95	3.16	3.51	3.51
GRADIENTE HIDRAULICO	20	40	40	30	10	20	30	20
CARGA (Kg/cm ²)	0.29	0.56	0.55	0.44	0.15	0.28	0.43	0.30
HUMEDAD INICIAL (%)	13.40	13.70	9.20	9.30	11.10	9.30	12.91	13.29
HUMEDAD FINAL (%)	16.30	---	10.20	11.30	12.90	14.00	14.82	14.74
DENSIDAD SECA (g/cm ³)	1.92	1.94	2.13	2.09	2.02	2.05	1.9	1.86
GRADO DE saturación	95	96	98	100	95	96	98	100
K (20°C) (cm/seg)	2.7*10 ⁻⁷	1.2*10 ⁻⁷	4.6*10 ⁻⁷	2.3*10 ⁻⁷	4.3*10 ⁻⁷	2.7*10 ⁻⁷	1.22*10 ⁻⁷	1.32*10 ⁻⁷
OBSERVACIONES	100% P. Est.	100% P. Est.	100% P. Est.	100% P. Est.	100% P. Est.	100% P. Est.	100% P. Est.	100% P. Est.

TABLA 4.2
ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA CANTERA PRINCIPAL-POMACOCCHA
(PROYECTO MARCA II)

Tipo de Explorac.	Nº Explorac.	Prof. (m)	Ensayos Estándar							Ensayos Especiales		
			Granulometría		Humedad	Límite	Límite	Límite	Clasificación	Permeabilidad	Máxima	Optimo
			% que pasa			Líquido	Plástico	Contracción	S.U.C.S.	Pared Rígida	Densidad	Contenido
			Tamizado								Seca	Humedad
			4.75 mm	0.075 mm								
			Nº 4	Nº 200	W	LL	LP	LC		K	M.D.S.	O.C.H.
			%	%	%	%	%	%		cm/s	gr/cc	%
Calicata	CP-4	---	46.34	27.13	7.77	33.80	20.67	20.71	GC	2.7*10 ⁻⁷	1.92	13.40
Calicata	CP-5	0.20-4.00	82.07	50.11	9.77	25.36	13.31	16.70	CL	1.2*10 ⁻⁷	1.94	13.07
Calicata	CP-6	0.10-4.00	51.13	21.36	3.65	23.51	11.45	15.75	GC	4.6*10 ⁻⁷	2.13	9.20
Calicata	CP-7	---	65.03	33.76	6.93	24.14	11.95	16.65	GC	2.3*10 ⁻⁷	2.09	9.25
Calicata	CP-9	---	66.69	38.77	8.53	26.20	12.40	17.45	GC	4.3*10 ⁻⁷	2.02	11.10