

# Cálculo de la confiabilidad de las ecuaciones de permeabilidad según Kozeny – Carman y Allen Hazen en arenas naturales

Jhon D. Sullca Mamani\*, Edwin Quispe Bruna\*

Recibido 10 de junio de 2015, aceptado 11 de agosto de 2015

*Received: June 10, 2015      Accepted: August 11, 2015*

## RESUMEN

El tema a investigar es sobre la permeabilidad de los suelos en arenas. Nos concentraremos en los Métodos indirectos para la Medición del Coeficiente de permeabilidad (K). Estos métodos han sido propuestos por varios investigadores, de los cuales se elegirá dos métodos de los siguientes autores; Kozeny – Carman (1937,1956) y Allen Hazen (1930), esto dado para suelos finos (arenas), de estas dos formas se determinará el coeficiente de permeabilidad (K) en las muestras de suelo que obtendremos de diferentes canteras de la ciudad de Juliaca (Maravillas, Isla, Unocolla), así mismo del fundo denominado Chullunquiani, el cual alberga el campus de la Universidad Peruana Unión. De los resultados, se obtiene la confiabilidad de las constantes que presenta uno u otro método indirecto respecto al de prueba de carga constante, lo que permite la validación o corrección de las formulas empíricas planteadas por Kozeny – Carman y Allen Hazen. Las diferencias significativas se presume que se deban a las características distintas de los suelos del distrito de Juliaca, respecto a las que inicialmente fueron planteadas según los autores antes mencionados. El resultado de esta investigación proporciona información útil a los profesionales que a menudo requieren conocer las características hidráulicas del suelo de manera inmediata y confiable.

**Palabras clave:** Permeabilidad, Coeficiente (K), Métodos Empíricos, Carga constante.

---

\* Estudiantes de Ingeniería Civil. Universidad Peruana Unión – Juliaca. Email: dickber.sullca@gmail.com, edw\_21\_1dh@hotmail.com.

## ABSTRACT

Our main interest is to do research on soil permeability in sands. Our focus is on indirect methods for measuring permeability coefficient (K), these methods have been proposed by several researchers, of which two methods will be chosen; Kozeny - Carman (1937.1956) and Allen Hazen (1930), this is for fine grained soils (sands), of these two forms permeability coefficient will be determined (K) in the soil samples that we will get from different quarries in Juliaca city (Maravillas, Isla, Unocolla); likewise, from the farm called Chullunquiani, which is home to the campus of Peruvian Union University. From the results we get, reliability of the constants that each indirect method presents with respect to the constant load test, which allows validation or correction of empirical formulas posed by Kozeny - Carman and Allen Hazen. Significant differences are presumed to be due to the different characteristics of soils in Juliaca district, respecting to those which were initially posed by the aforementioned authors. The result of this research provides useful information to professionals who often require knowledge of the hydraulic characteristics of the soil immediately and reliably.

**Keywords:** permeability, coefficient (K), Empirical Methods, Constant load

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día las pruebas de permeabilidad tienen diversas aplicaciones, un efecto decisivo sobre el costo y las condiciones que se pueden encontrar en muchos procedimientos constructivos, como por ejemplo, excavaciones a cielo abierto en arena, bajo agua o la velocidad de consolidación de un estrato de arcilla bajo el peso de un terraplén, en la construcción de un estanque, ya que es importante determinar la posición relativa de las capas permeables e impermeables, al llevar a cabo su diseño se debe evitar la presencia de una capa permeable en la superficie de esta ya que podría ver perdida excesiva de agua a causa de la filtración.

Por tal motivo es significativo calcular el valor del coeficiente de permeabilidad en arenas y que los resultados que se obtengan del permeámetro de carga constante, que da un valor confiable del coeficiente de permeabilidad, sean también casi similares por los métodos indirectos mostrando de esta forma también su confiabilidad, en las arenas Naturales.

Las teorías de la mecánica de suelos están elaboradas a base de investigaciones ya que para la validación de cada una de ellas se han realizado numerosos ensayos de suelos en laboratorio, básicamente para el presente trabajo es comprobar aquellas teorías con los suelos de nuestro entorno local y poder determinar valores confiables.

El tema a investigar será sobre la permeabilidad de los suelos en arenas. Nos con-

centraremos en los Métodos indirectos para la Medición del Coeficiente de permeabilidad (K). Estos métodos han sido propuestos por varios investigadores, de los cuales se elegirá dos métodos de los siguientes autores; Kozeny – Carman y Allen Hazen, esto dado para suelos granulares finos (arenas). De estas dos formas se determinara el coeficiente de permeabilidad (K) en las muestras de suelo que obtendremos del fundo denominado Chullunquiani.

En una primera etapa se someterá el suelo a ensayos de laboratorio, específicamente por el método de Prueba de Carga Constante, esto con la finalidad de obtener el valor real del coeficiente de permeabilidad (k) en suelos finos(arenas) del entorno, a medida que se hará estos ensayos se determinara las variables necesarias para el cálculo por los métodos indirectos esto también mediante pruebas de laboratorio, de tal forma que se pueda conocer las propiedades físicas de las arenas de nuestra zona, la segunda etapa determinara el coeficiente de permeabilidad por los métodos indirectos con lo que se tendrá ya los resultados que darán a conocer su confiabilidad, las que serán comparadas al valor real del coeficiente (k), obtenido del ensayo de carga constante. Finalmente se podrá evaluar y ver cuál de los métodos indirectos presenta una confiabilidad más próxima a cero según la desviación estándar.

El resultado de esta investigación proporciona información útil a los profesionales que a menudo requieren conocer las características hidráulicas del suelo de manera inmediata y confiable.

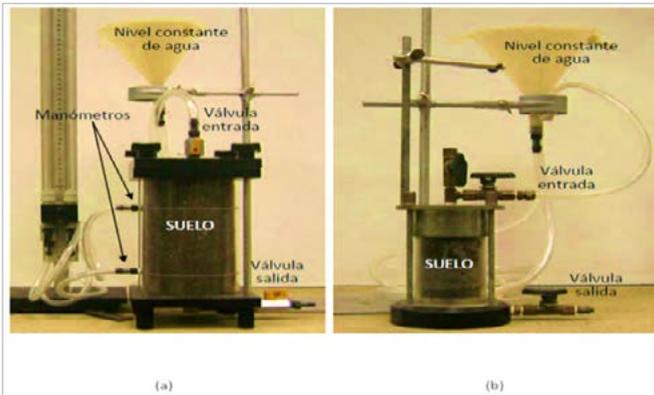
## **Materiales y Métodos**

La presente investigación toma en cuenta muestras del entorno local para lo cual se considera las principales canteras que contienen material fino granular (Isla, Maravillas, Unocolla, UPeU) de la ciudad de Juliaca, las cuales servirán para los ensayos de permeabilidad, por el método de carga constante, posteriormente el material será evaluado para conseguir las propiedades necesarias como la relación de vacíos (e) el diámetro efectivo que se obtiene de sus parámetros granulométricos (D10), esto para el cálculo de la confiabilidad de las ecuaciones empíricas planteadas por Kozeny-Carman, y Allen Hazen con las que se obtiene del coeficiente de permeabilidad (k). Al desarrollar los ensayos se podrá determinar que método es más confiable o se acerca más a los resultados de la prueba de carga constante.

El equipo utilizado para este ensayo recibe el nombre de permeámetro (Carga Constante), el cual consiste en un cilindro de acero, con un diámetro mínimo de aproximadamente 8 a 12 veces el tamaño máximo de las partículas según la norma ASTM.

El equipo además cuenta con dos piedras porosas cilíndricas de 2 cm de altura y un diámetro de 8.2, tanto en su extremo inferior como superior, las cuales son encargadas de contener la muestra y evitar el transporte de partículas. A veces también es necesaria la utilización de filtros para evitar el paso del material muy fino, el cual no es retenido por las piedras porosas. Estas piedras tienen una permeabilidad superior a la de la muestra de suelo, para evitar retrasar el drenaje.

Este procedimiento se realiza bajo la norma ASTM D-2434 (2006), la cual describe los procesos para determinar el coeficiente de permeabilidad bajo carga constante para flujo laminar a través de suelos granulares, estos son aquellos suelos que no contienen más de un 10% de partículas que pasen por la malla N°200 ASTM.



**Figura1.** Permeámetros utilizados en ensayo de carga constante  
(a) Permeámetro ASTM (b) Permeámetro pequeño.

Para los ensayos es necesario trabajar con un permeámetro de carga constante con el cual no se cuenta, teniendo aquí los parámetros se construirá uno de acuerdo a los parámetros de la norma ASTM siendo este equipo indispensable para concluir la investigación. A continuación se dará a conocer las partes importantes del equipo para su fabricación.

- **Válvula de alimentación:** Está compuesta por una válvula ubicada en la parte superior del permeámetro a la cual se le acopla una manguera que se conecta al estanque de suministro de agua.
- **Válvula de salida:** Está compuesta por una válvula ubicada en la parte inferior del permeámetro a la cual se le acopla una manguera para realizar la descarga del fluido, también por este elemento se realiza la etapa de saturación.
- **Estanque de alimentación:** Aparato cilíndrico de aproximadamente 50cm de diámetro con una capacidad de 10lts. En la parte superior cuenta con una entrada para poder suministrarle el agua, además por este conducto se le conecta la bomba de vacío para desairear el agua. En su parte inferior posee una válvula desde la cual se le suministra el agua desaireada a la válvula de alimentación.
- **Cuerpo metálico:** Consta de dos elementos, uno en la parte inferior (Base) y otro en la parte superior (Tapa), unidos entre sí por 4 barras con tuercas para confinar la muestra. El permeámetro de la Figura 1(b) consta con tan solo 3 barras.

Las dimensiones de los permeámetros utilizados se muestran en la siguiente Tabla.

**Tabla 1**

*Dimensiones del permeámetro*

Dimensiones	Permeámetro pequeño	Permeámetro ASTM
Altura (cm)	6.6	18.6
Diámetro (cm)	6.35	11.4
Área cm <sup>2</sup>	31.67	102.07
Volumen cm <sup>3</sup>	209	1898



**Figura 2.** Ensayo de permeabilidad con el permeámetro de por carga constante

### **Método empleado**

Existen situaciones en las cuales no se puede acceder a un método directo para medir el coeficiente de permeabilidad, circunstancias en las cuales es muy útil conocer métodos indirectos estos se basan en otros parámetros del suelo y son producto de variadas investigaciones, en la siguiente tabla se mostrara las formulas empíricas de algunos autores para el cálculo del coeficiente de permeabilidad.

Para el desarrollo de la investigación se considerara las formulas empíricas de Kozeny-Carman y Allen Hazen

AUTOR	ECUACIONES	CONDICIÓN
ALEN HAZEN	$K(\text{cm/seg}) = C \cdot D_{10}^2$ C= constante y varia de (1-1,5) $D_{10}$ = Diametro efectivo	Arenas uniformes y limpias
CASA GRANDE	$k(\text{cm/seg}) = 1,4 \cdot e^2 \cdot k_{0,85}$ e = Relación de vacíos $k_{0,85} = k$ ; para un e = 0.85	Arenas limpias
KOZENY-CARMAN	$k(\text{cm/seg}) = \frac{C_1 \cdot e^3}{1 + e}$ $C_1$ = constante que depende de una prueba	ARENAS
SAMARE SINGLE Y HUANG	$k(\text{cm/seg}) = C_3 \cdot \frac{e^n}{1 + e}$ $C_3$ y n constante determinar en laboratorio	Arcilla normalmente consolidadas

**Figura 3.** Formulas empíricas para el cálculo de la permeabilidad

### Relación de vacíos (e)

Se denomina relación de vacíos a la existente entre el volumen de los vacíos y el de los sólidos de un suelo. Puede alcanzar valores mayores a 1. Esta relación se expresa como:

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Donde:

$V_v$ = volumen de vacíos

$V_s$ = volumen de solidos

### Porosidad (n)

La porosidad se define como la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total.

El valor de la porosidad varía entre  $0 < n < 1$ . Se expresa como:

$$n = \frac{V_v}{V}$$

Donde:

$V$ =volumen total

La porosidad también puede expresarse en función del índice de vacíos y viceversa,

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

$$e = \frac{n - 1}{n}$$

Para el cálculo de la relación de vacíos se hace el ensayo de gravedad específica con el picnómetro obteniendo la gravedad específica de cada arena mediante la siguiente formula:

$$e = \frac{V * G_s * \gamma_w}{W_s}$$

Donde:

V: volumen de la muestra (cm<sup>3</sup>)

G<sub>s</sub>: gravedad específica

$\gamma_w$ : Peso específico del agua (1gr/cm<sup>3</sup>)

W<sub>s</sub>: peso del suelo (gr)

Y para el cálculo del diámetro efectivo será necesario hacer la curva granulométrica de cada cantera.

### **Ensayo de permeabilidad de suelos prueba de carga constante**

**Normativa:** ASTM D 2434 (PARA SUELOS GRANULARES)

#### **Materiales:**

- Arena granular
- Agua potable

#### **Procedimiento:**

1. Se destapa el permeámetro, se coloca en el interior y en la parte de abajo una piedra filtro o piedra porosa.
2. Se va llenando el permeámetro con el suelo en estudio, para esto se van formando capas de material y se van compactando por medio de un pisón, de tal forma que al suelo se le da el acomodo que tenía este en el lugar o se puede reproducir el peso volumétrico que este tenía en el campo.
3. Se tapa el permeámetro, se le ponen los tornillos, se aplica agua al embudo del permeámetro y se deja que se sature el material, hasta que no se vean burbujas de aire
4. Se instala el embudo a una altura aproximada de 2 veces la altura de la muestra y se sigue vaciando agua para que no le vaya a entrar aire al sistema

5. Se procede a hacer las mediciones de volumen, al poner una probeta en la salida para un determinado tiempo, que puede ser 1 minuto ó 2 minutos.
6. Se anota el volumen de agua recogido, expresándolo en cm<sup>3</sup>, repitiendo esta acción tres veces, para obtener un promedio.

**Metodología de cálculo**

Se procede a realizar el cálculo del coeficiente de permeabilidad con la siguiente expresión.

$$kt = \frac{v * L}{A * h * t}$$

Donde:

V= es el volumen de agua recolectado

L= distancia entre manómetros

A=es el área de la sección transversal en el espécimen

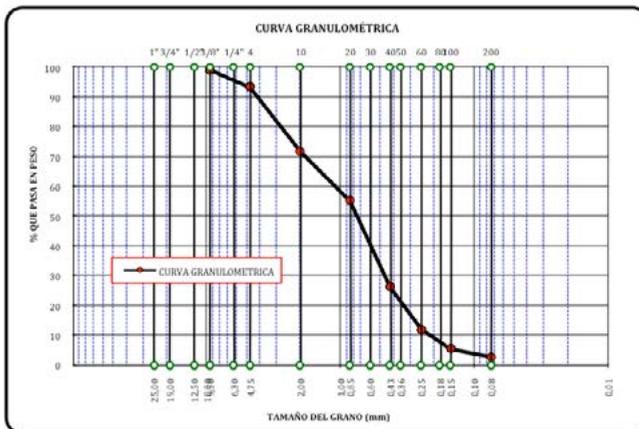
t =es el tiempo de la descarga

h =es la cabeza hidráulica total.

**Muestras de Estudio**

La presente investigación toma en cuenta muestras del entorno local para lo cual se considera las principales canteras que contienen material fino granular (Isla, Maravillas, Unocolla, UPeU) de la ciudad de Juliaca, las cuales servirán para los ensayos de permeabilidad.

A continuación se presenta las curvas granulométricas de los suelos en estudio.



**Figura 4.** Curva granulométrica de la cantera isla (arena natural).

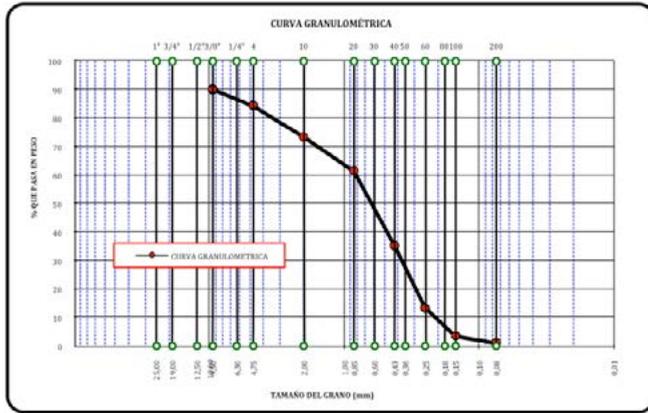


Figura 5. Curva granulométrica de la cantera de maravillas (arena natural).

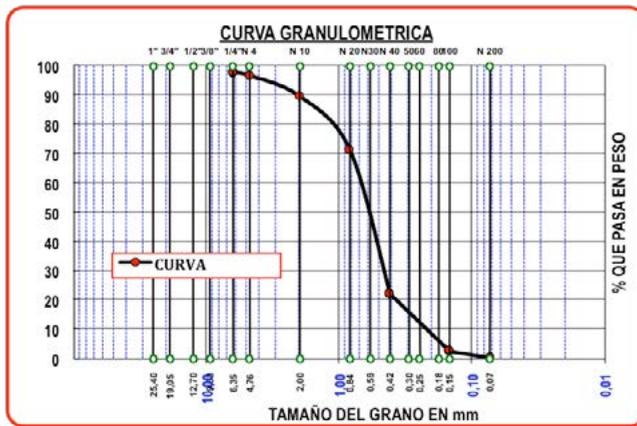


Figura 6. Curva granulométrica de la cantera de la UPEU (arena natural).

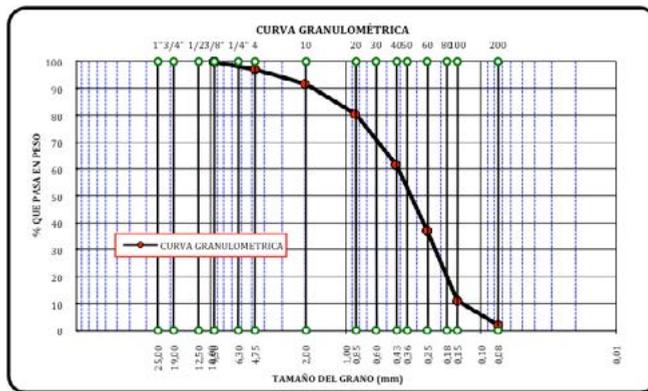


Figura 7. Curva granulométrica de la cantera de Unocolla (Curva cóncava).

### Instrumentos:

- Permeámetro de carga constante
- Termómetro
- Recipiente calibrado
- Cronómetro
- Bureta
- Flexómetro
- Probetas graduadas
- Papel filtro

### Análisis de datos

Los datos obtenidos de la investigación, se muestran en la siguiente tabla. Se presenta el volumen de la muestra, peso del suelo seco, altura de carga y el tiempo promedio de la duración de las pruebas. Ello con la finalidad de poder determinar la permeabilidad directa de las arenas.

De la misma forma se tienen los datos de la relación de vacíos y diámetro efectivo, que nos permiten calcular las constantes de las ecuaciones que son objeto de estudio.

**Tabla 2**

*Detalles de las Canteras analizadas*

Tipo de Suelo	Volumen Muestra (cm <sup>3</sup> )	Peso del Suelo Seco (gr)	Altura de Carga (cm)	Tiempo de Prueba Promedio (seg)	K (cm/ seg)	e*	D10 *(mm)	C* (Allen Hazen)	C1* (Kozeny Carman)
Cantera Isla (natural)	459.449	707.551	42	143.625	0.027	0.623	0.20	0.683	0.184
Cantera Maravi- llas (natural)	459.449	707.551	42	83.75	0.023	0.625	0.22	0.484	0.156
Cantera UPeU (natural)	459.449	716.74	42	57.625	0.033	0.603	0.21	0.754	0.243
Cantera Unoco- lla (concaba)	459.449	707.551	42	173.75	0.011	0.625	0.15	0.490	0.073
DESVIACIÓN ESTANDAR								0.137	0.071
PROMEDIO DE C , C <sub>i</sub>								0.603	0.164

\*e = Relación de Vacíos, D10 = Diámetro Efectivo, K = Permeabilidad, C = Constante de Allen Hazen, C1 = Constante de Kozeny

En las dos últimas columnas de la tabla se presenta las constantes obtenidas para Hazen y Kozeny. Las cuales nos servirán para determinar la confiabilidad de las expresiones en estudio.

Con los datos obtenidos y a fin de cumplir los objetivos planteados, se determina los promedios y las desviaciones estándar correspondientes, como se discutirá más adelante.

## Resultados y Discusión

A continuación se presenta una discusión de los resultados obtenidos que se mostraron en la tabla 2.

### Resultados 1

Para la fórmula de Allen Hazen se ha observado que para el tipo de curva analizado (Cóncava) La constante de la fórmula de Allen Hazen es igual a 0.6026 como promedio, con una desviación estándar de 0.1367. Esto último nos indica que el promedio es aceptable por cuanto la desviación estándar es baja. Lo que significa que la ecuación de Hazen puede reescribirse como:

$$K = 0.6026 * D_{10}^2$$

En caso se quisiera mejorar y aproximar de una manera más adecuada la expresión de Hazen, sería necesario incluir otras variables que d seguro intervienen en el cálculo de la permeabilidad de una arena.

### Resultados 2

Para la fórmula de Kozeny-Carman se ha observado que para el tipo de curva analizado la constante obtenida de la fórmula de Kozeny-Carman es igual a 0.1641 como promedio, con una desviación estándar de 0.0706 esto nos indica que el promedio es muy aceptable, mostrando un alto grado de confiabilidad por cuanto la desviación estándar es muy baja, lo que significa que la ecuación de Kozeny-Carman se puede reescribirse como:

$$K = 0.1641 * \frac{e^3}{1 + e}$$

## Conclusiones

Las formulas planteadas por Hazen y Kozeny representan cierta validez al momento de la determinación de las constantes de estudio. Como se pudo observar en el análisis de datos.

Se puede afirmar que la fórmula planteada por Kozeny-Carman es más confiable en

arenas naturales, teniendo ésta en consideración, la relación de vacíos, que es una variable importante en comparación a la fórmula planteada por Allen Hazen, que toma el diámetro efectivo el cual es una propiedad característica de arenas graduadas (arenas uniformes y limpias), y que no todo tipo arena cumple por lo que es importante tener en consideración dicho factor.

En caso se quisiera mejorar la desviación estándar en los valores obtenidos para ambas ecuaciones, sería necesario incluir otras variables de estudio, que en este caso podrían ser la densidad relativa del suelo y los parámetros granulométricos.

La temperatura del agua influye de manera significativa en el cálculo de la permeabilidad de un suelo, haciendo que este pueda variar notablemente.

## Recomendaciones

Se recomienda continuar con el trabajo de investigación a fin de dar validez estadística con mayor cantidad de pruebas.

El estudio puede continuarse, tomando en consideración el tipo de curva convexa y así poder observar los resultados que se encuentren.

La altura de carga debe tomarse como constante durante todo el proceso de prueba que se realice, de tal manera que la velocidad de infiltración no varíe de forma considerable.

Se recomienda ampliar y complementar el estudio con gravas en donde se tendrá otro tipo de flujo y las ecuaciones posiblemente varíen de forma considerable.

## Referencias

- Angelone, S., & Garibay, M. T. (2006). *Permeabilidad de Suelos*. Argentina.
- Bautista, G. (2012). *Comparación del coeficiente de permeabilidad obtenidos en el laboratorio con las fórmulas empíricas de Allen Hazen, Schlichter y terzagui para arenas del río Mancoy río Frio*. Bolivia.
- Berry, P., Reid, D. (1993). *Mecánica de Suelos*. Colombia: Editorial. Matha Edna Suarez R. 1ra edición.
- Crespo, C. (2004). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. Mexico: Editorial. LIMUSA. 5ta edición.
- Lambe, W. (1998). *Mecánica de Suelos*. Mexico: Editorial. Limusa. 2da edición.
- Lopez, E. J. (2012). *Estudios de Permeabilidad en Materiales de lixiviación*. Santiago.
- M. Das, B. (2010). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Mexico: Editorial. Edamsa impresiones S.A de C.V. 2da edición.