

ENSAYOS DE PERMEABILIDAD EN SUELOS COMPACTADOS



Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Nacional de Ingeniería

Autores:

- Yngrid Alarcón Barcena
- Jorge E. Alva Hurtado



Contenido

- **Introducción**
- **Métodos para la Medición del Coeficiente de Permeabilidad del Suelo**
- **Equipos de Laboratorio**
- **Ensayos de Laboratorio**
- **Conclusiones y Recomendaciones**

Introducción

Flujo de Agua en Medio Poroso

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, z

h = carga total

Métodos Para la Medición del Coeficiente de Permeabilidad del Suelo

Fórmulas de la Propiedad Hidráulica de los Suelos

Flujo de Agua

Coeficiente de Permeabilidad

Velocidad y Presión de Filtración

Métodos Directos

Métodos Indirectos

Ley de Darcy

$$Q = k \cdot A \cdot i$$

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L}$$

Donde:

Q = gasto (cm^3/seg)

A = área total de la sección transversal

i = gradiente hidráulico

k = coeficiente de permeabilidad

Flujo de Agua

Ecuación de Bernoulli:

$$H = h_z + \frac{\mu}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

h_z = carga de posición o de elevación

$\frac{\mu}{\gamma_w}$ = carga de presión debida a la presión de poro μ

$\frac{v^2}{2g}$ = carga de velocidad cuando la velocidad de flujo es v

Coeficiente de Permeabilidad

“ Es la velocidad de flujo producida por un gradiente hidráulico unitario”

Factores que intervienen:

- Densidad del suelo**
- Distribución de tamaño de partículas**
- Forma y orientación de partículas**
- Grado de saturación y presencia de aire**
- Viscosidad del suelo que varía con la temperatura**

Rango de valores de k (cm/seg)

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

Velocidad y Presión de Filtración

Definición .- Al movimiento de una masa de suelo se le llama INFILTRACIÓN. A escala microscópica , el flujo de agua forma una ruta sinuosa a través de los vacíos del suelo.

En la ecuación de Darcy: v , se considera como una velocidad aparente , esto es la velocidad de flujo con respecto a una sección del suelo de área A .

Por lo tanto:

La velocidad real a través de los poros será mayor y se define como VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN

Métodos Directos

- **Ensayo de Carga Constante**
- **Ensayo de Carga Variable**
- **Ensayo In-Situ**

Métodos Indirectos

- Cálculo de k de la curva granulométrica
- Cálculo de k del ensayo de consolidación
- Cálculo de k del ensayo de capilaridad horizontal

Equipos de Laboratorio

- **Equipo de Permeabilidad de Pared Rígida**
- **Equipo de Permeabilidad de Pared Flexible**

Equipo de Permeabilidad de Pared Rígida

Partes:

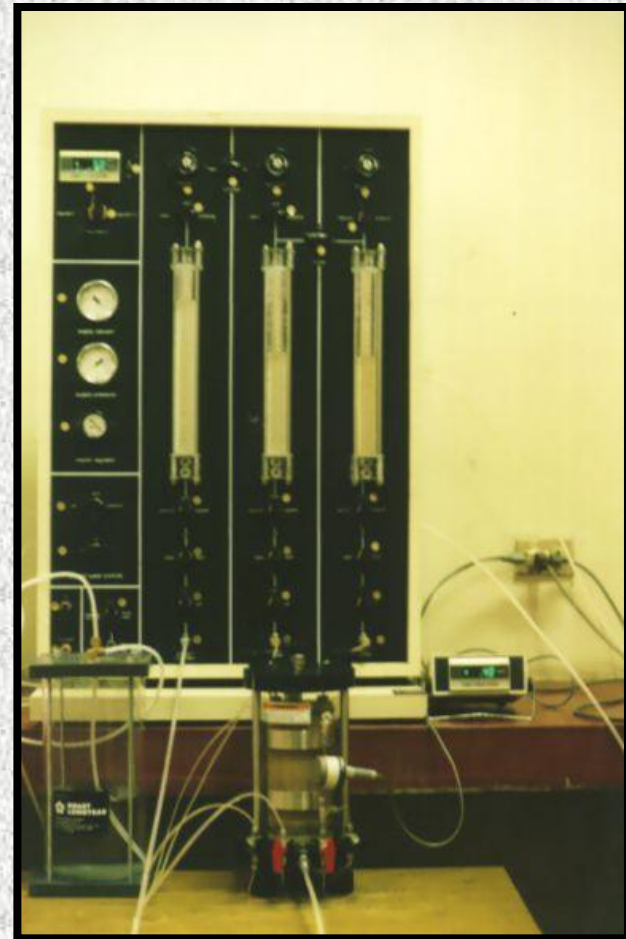
- Tanque de agua
- Manómetro
- Regulador de presión
- Recipiente para almacenar el agua drenada
- Permeámetro
- Equipo de compactación
- Aparatos misceláneos



Equipo de Permeabilidad de Pared Flexible

Partes:

- Panel de Control de Presiones
- Tanque de Agua
- Celda de Permeabilidad
- Bomba de Vacío
- Transductor de Presión
- Indicador de Lectura

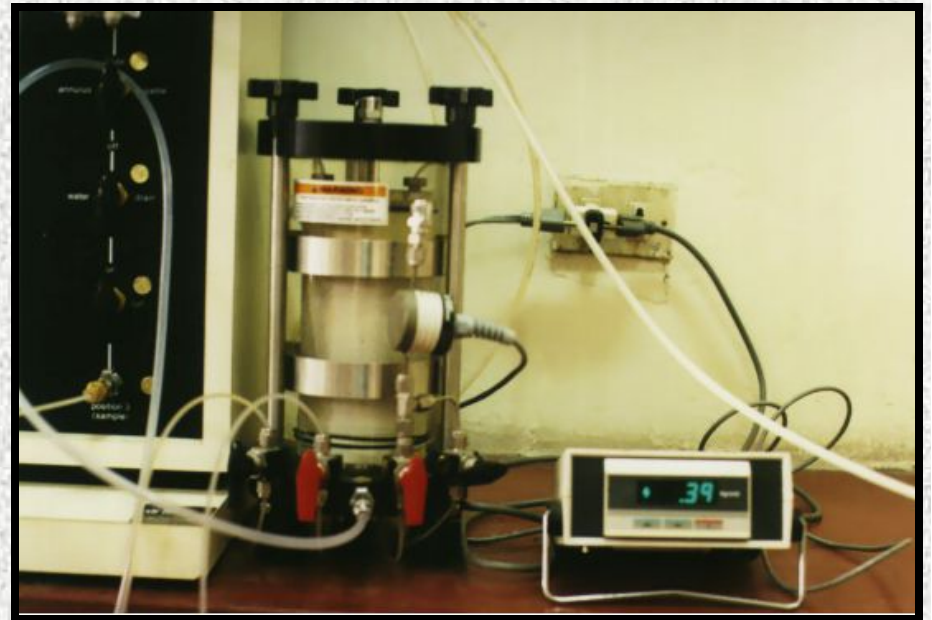


Celda de Permeabilidad

Celda de Permeabilidad

Partes:

- Placas superior e inferior
- Pared de celda
- Tres varillas de fijación
- Tres patas de base
- Pedestal de base y casquete superior



Procedimiento

- **Preparación del equipo**
- **Preparación de la muestra**
- **Presión de confinamiento y saturación de la muestra**
- **Medición de la conductividad hidráulica**

Preparación de la Muestra

- **Muestras Inalteradas**
- **Muestras Compactadas**

Muestras Compactadas

- Usar una muestra secada al horno y con un tamaño máximo de partícula menor a N°4
- Calcular el peso (aprox. 1500gr) y el volumen de la muestra
- Calcular la cantidad de agua
- Mezclar la muestra con el agua, para seguidamente dividirla en cinco capas
- Cada capa será compactada y escarificada

Presión de Confinamiento y Saturación de la Muestra

- Usar agua desaireada para aplicar confinamiento y contrapresión al espécimen.
- Aplicar una presión de confinamiento menor a 5 psi. para llenar la celda y por la línea inferior de drenaje una contrapresión de 2 psi.
- La saturación se verifica midiendo el parámetro B.

$$(B \geq 0.95)$$

$$B = \frac{\Delta \mu}{\Delta \sigma_c}$$

Medición de la Conductividad Hidráulica

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot t \cdot h}$$

Donde:

k = conductividad hidráulica (cm/s)

Q = cantidad de flujo (cm³)

L = longitud de la muestra (cm)

A = área transversal de la muestra (cm²)

t = intervalo de tiempo (s)

h = diferencia de carga hidráulica (mH₂O)

Ensayos de Laboratorio

Determinación de k en el Laboratorio

Descripción de Materiales Ensayados

Evaluación de Resultados

Lagunas de Oxidación

Presa Pomacocha

Determinación de K en el Laboratorio

Principales Problemas Asociados a la Confiabilidad:

- Obtención de buenas muestras representativas**
- Reproducción de las mediciones en laboratorio**
- Reproducción de las condiciones de campo**

Descripción de Materiales Ensayados

Lagunas de Oxidación de Cortijo y Covicorti (Trujillo)

Presa Pomacocha del Proyecto Marca II (Junín)











LAGUNA DE OXIDACIÓN CORTIJO-TRUJILLO (1998)



LAGUNA DE OXIDACIÓN COVICORTI-TRUJILLO (1998)

ENSAYOS DE LABORATORIO CORTIJO - COVICORTI

CANTERA O SONDAJE	CANTERA	CANTERA
PROYECTO	CORTIJO	COVICORTI
ESTADO	REMOLDEADO	REMOLDEADO
CLASIFICACION (SUCS)	SC	SC
CONTRAPRESION (Kg/cm²)	3.51	3.51
GRAD. HIDRAULICO	30	20
CARGA (Kg/cm²)	0.43	0.30
HUM. INICIAL (%)	12.91	13.29
HUM. FINAL(%)	14.82	14.74
DENSIDAD SECA(Kg/cm³)	1.9	1.86
GRADO DE SATURACION	98	100
K (20°C) (cm/seg)	1.22x10⁻⁷	1.32x10⁻⁷
OBSERVACIONES	100 % P.Est.	100 % P.Est.

ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA CANTERA PRINCIPAL POMACOCHA (PROYECTO MARCA II)

Tipo de Exploración	Número de Exploración	Profundidad (m)	Ensayos Estándar							Ensayos Especiales		
			Granulometría		Humedad	Límite Líquido	Límite Plástico	Límite Contrac.	Clasif. S.U.C.S.	Perm. P. Flexible	Máxima Densidad Seca	Optimo Cont. Humed.
			% que pasa									
			Tamizado									
			475 mm	0.075 mm								
			N° 4	N° 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	2.7x10 ⁻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	1.2x10 ⁻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	4.6x10 ⁻⁷	2.13	9.20
Calicata	CP-7	—	65.03	33.76	6.93	24.14	11.95	16.65	GC	2.3x10 ⁻⁷	2.09	9.25
Calicata	CP-9	—	66.69	38.77	8.53	26.20	12.40	17.45	GC	4.3x10 ⁻⁷	2.02	11.10

ENSAYOS DE LABORATORIO MARCA II

CANTERA o SONDAJE	CP-1	CP-2	CP-3	CP- 4	CP-5	CP-6
PROYECTO	MARCA II	MARCA II	MARCA II	MARCA II	MARCA II	MARCA II
ESTADO	REMOLDEADO	REMOLDEADO	REMOLDEADO	REMOLDEADO	REMOLDEADO	REMOLDEADO
CLASIFICACION (SUCS)	GC	CL	GC	GC	GC	GC
CONTRAPRESION (Kg/cm ²)	2.81	2.81	2.95	2.81	2.95	3.16
GRADIENTE HIDRAULICO	20	40	40	30	10	20
CARGA (Kg/cm ²)	0.29	0.56	0.55	0.44	0.15	0.28
HUMEDAD INICIAL (%)	13.40	13.70	9.20	9.30	11.10	9.30
HUMEDAD FINAL (%)	16.30	—	10.20	11.30	12.90	14.00
DENSIDAD SECA (gr/cm ³)	1.92	1.94	2.13	2.09	2.02	2.05
GRADO DE SATURACION	95	96	98	100	95	96
k (20°C) (cm/seg)	2.7x10 ⁻⁷	1.2x10 ⁻⁷	4.6x10 ⁻⁷	2.3x10 ⁻⁷	4.3x10 ⁻⁷	2.7x10 ⁻⁷
OBSERVACIONES	100 %P.Est.	100 %P.Est.	100 % P.Est.	100 % P.Est.	100 % P.Est.	100 % P.Est.

Conclusiones

- 1) El método de ensayo utilizado es aplicable para un flujo unidimensional dentro de los materiales porosos.**
- 2) Este método de ensayo proporciona un medio para determinar la conductividad hidráulica a un nivel controlado de esfuerzos efectivos.**
- 3) La saturación será verificada con la medición del parámetro B, el que deberá ser mayor o igual al 95%.**

Conclusiones

- 4) Las presiones de filtración asociadas a grandes gradientes hidráulicas pueden consolidar muestras blandas y compresibles y además reducir su conductividad hidráulica.
- 5) La ventaja más importante es la optimización del tiempo de saturación para muestras de suelos impermeables.
- 6) En los materiales ensayados, tanto para la 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%.

Recomendaciones

- 1) Se recomienda usar agua desaireada para minimizar el potencial de difusión del aire a través de la membrana dentro de la muestra.
- 2) Se deberá hacer uso del gradiente hidráulico según el tipo de muestra a ensayar.

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	GRADIENTE HIDRÁULICO MÁXIMO RECOMENDADO
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

Recomendaciones

- 3) Deberá usarse un equipo adecuado para el método de compactación.
- 4) Se recomienda tamizar la muestra por la malla N°4.
- 5) Verificar antes de realizar el ensayo que las válvulas estén cerradas, el tanque y las buretas llenas con agua y a un nivel adecuado.
- 6) Eliminar las burbujas de aire del tanque de agua y de las buretas (aprox.30 minutos) antes de ensayar el espécimen.