

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**



**FLUJO DE FLUIDOS  
A TRAVES DE SOLIDOS  
G R A N U L A D O S**

**TESIS PRESENTADA POR  
ANGEL RICARDO VILLAFUERTE**

**PARA OPTAR EL GRADO DE  
DOCTOR EN QUIMICA INDUSTRIAL**

**JUNIO DE 1971**

**SAN SALVADOR,**

**EL SALVADOR,**

**CENTRO AMERICA**



532.5  
V. 710  
1971  
f. Inq. y drq.  
q. 1

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

DR. RAFAEL MENJIVAR

D/autor/29/7/71#4112

FACULTAD DE INGENIERIA Y  
ARQUITECTURA

DECANO:

ING. FELIX ANTONIO ULLOA

SECRETARIO:

ING. RODOLFO JENKINS

COORDINADOR DE INGENIERIA Y  
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE  
INGENIERIA QUIMICA:

DR. EDUARDO BADIA.



J U R A D O S

PRIMER EXAMEN GENERAL  
PRIVADO DE DOCTORAMIENTO

PRESIDENTE:

Dra. Margarita Monge Rico

VOCALES:

Dr. Raúl Arévalo Álvarez

Dra. Rosa Hernández de Díaz

SEGUNDO EXAMEN GENERAL  
PRIVADO DE DOCTORAMIENTO

PRESIDENTE:

Dr. Eduardo Badía S.

VOCALES:

Dr. Federico Miguel Huguet

Ing. José Salvador Fernández

TESIS DE GRADO

Dr. Eduardo Badía S

Dr. Francisco Javier Mejía

Ing. Mario Luis Fernández F.

DEDICATORIA

A Mi abnegada madre  
Ana Aguirre Castro

A mi querida esposa  
Marylee Bridge de Villafuerte

A mi hijo Angel Ricardo

A la Universidad de El Salvador con infinito agradecimiento  
por la formación obtenida.

# I N D I C E

	Nº Página
INTRODUCCION	
Sección 1 MEDIO POROSO	2
1.1 Métodos para determinación de Textura de Suelos	
1.2 Descripción de partículas sólidas	
Sección 2 DETERMINACION DE LA DISTRIBUCION DE TAMAÑO DE GRANULOS POR MEDIO DE TAMIZ.	6
2.1 Tamizado.	
2.2 Clasificación por tamaño	
2.3 Tamices	
2.4 Abertura o Tamaño del tamiz	
2.5 Normalización de las aberturas de los tamices	
2.6 Propósitos del tamizado	
2.7 Variables del material que se tamiza	
Sección 3 REPRESENTACIONES TÍPICAS DEL ANALISIS DE TAMIZADO	11
3.1 Tamaño normalizado de algunas mallas tipo Tyler Tabla Nº 1	
3.1.1 Resultado Típico de un análisis de tamizado Tabla Nº 2	
3.1.2 Resultado Típico de un análisis de tamizado en forma acumulativa, Tabla Nº 3	
3.1.3 Gráficas	
3.2 Cálculos del diámetro promedio	
3.2.1 Basado en la longitud	
3.2.2 Basado en la masa	
3.2.3 Basado en la superficie por unidad de volumen	
Sección 4. ENSAYOS DE AGREGADO FINO (ARENA)	19
4.1 Metodo Standard de Prueba para densidad	
4.2 Determinación del porcentaje de vacíos aparentes	
4.3 Datos Experimentales	
4.3.1 Datos Experimentales para fracciones -4+6- -6+8;-8+10;	
4.3.2 " " -10+12;-12+14 mallas	
4.3.3 " "	
4.3.4 " "	
4.3.5 " "	

...

...

Nº Página

4.4 Gráficas

Sección 5. CONCEPTO Y CLASIFICACION DE FLUJO

26

5.1 Flujo Estable

5.2 Flujo Uniforme

5.3 Velocidad de descarga

5.4 Ecuación de continuidad

Sección 6. HIDROSTATICA EN SUELOS

29

6.1 Ley básica de la Hidrostática

6.2 Ley de Darcy para flujo a través de suelos

6.3 Factores que afectan la permeabilidad

6.4 Concepto de radio Hidráulico en los poros del suelo

6.5 Ecuación de Carmay-Kozeny

6.5.1 Factores de forma para partículas no-esféricas

6.6 Ecuación de Rose

Sección 7. CONSTRUCCION DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

43

7.1 Construcción de los Manómetros

7.2 Construcción de la cámara de flujo

7.3 Abertura piezométrica en el lecho

7.4 Desmonte de la cámara de flujo

7.5 Soporte para los sólidos

7.6 Construcción del medidor de orificio

7.7 Construcción de las trampas aire-agua

Sección 8. PARTE EXPERIMENTAL

48

8.1 Procedimiento

8.2 Operación con agua

8.3 Ejemplos de cálculos efectuados

8.4 Cálculo de los factores de fricción utilizando los datos Experimentales.

Sección 9. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

54

9.1 Conclusiones generales y Análisis de Resultados

9.2 Observaciones y Recomendaciones.

...

Sección 10. A P E N D I C E

Nº Página  
56

10.1 Nomenclatura

10.2 Bibliografía

10.3 Gráficos

10.4 Tablas de Resultados Experimentales.

## I N T R O D U C C I O N

El siguiente estudio trata principalmente del flujo de líquidos a través de lechos porosos. El estudio del flujo de fluidos a través de sólidos es de suma importancia en Ingeniería Química y en Ingeniería Sanitaria.

Por ejemplo en filtros de arena rápidos, es la más importante aplicación de los lechos porosos en tratamiento de agua municipal e industrial. En los filtros de arena lentos la aplicación es confinada grandemente al tratamiento secundario o terciario de aguas negras.

En el campo de la Ingeniería Química, tiene aplicación importante en las unidades de intercambio de iones, torres de adsorción, torres de contacto, etc.

El experimento fue desarrollado a nivel piloto, siendo su fin primordial el que sirva para la enseñanza en el Laboratorio de Operaciones Unitarias con posibles aplicaciones en Mecánica de Suelos.

Se han incluido consideraciones teóricas, siendo de suma importancia para comprender el objeto del experimento y poder encontrarle posteriormente nuevas aplicaciones prácticas.



## SECCION 1.

### M E D I O   P O R O S O

Un medio poroso es por ejemplo: suelos, arenas, papel, concreto, cerámicas, etc.

El comportamiento del fluido en un solo poro obedece las leyes físicas - conocidas, en cambio el comportamiento macroscópico del material poroso es descrito por las propiedades promedio.

El tamaño lineal de un poro puede quedar definido por:

- 1) Longitud obtenida por medidas geométricas.
- 2) El tamaño del poro de un medio poroso ficticio o artificial con ciertas similitudes globales al medio poroso en estudio.
- 3) Parámetros que son observados indirectamente por ejemplo: conductividad hidráulica y eléctrica, difusividad, adsorción de fluido, inyección de mercurio, etc.

#### 1.1 Métodos para determinación de textura de suelos.

Pueden variar desde tamizado, sedimentación o clutración en suelos de granos gruesos, hasta métodos de microscopio, super-centrifugas y técnicas de rayos X en medios de granos finos. A continuación aparecen resumidos los métodos utilizados con diferentes materiales.

MÉTODOS PARA DETERMINACIÓN DE TEXTURA DE SUELOS (4)

Arcilla Ultra-Coloidal	Arcilla	Sedimento	Arena Fina	Arena Gruesa	Grava Y
	0.002 mm	0.02 mm	0.2 mm	2 mm.	
	←	←	←	←	←
			← Análisis de Tamizado		Medidas Directas
	←	← Sedimentación	←		
		←	← Elutriación		
	←	← Observación Óptica al Microscopio.	←		
Sedimentación en Super-Contrifugas		→ Microscopio Estereoscópico			
Conteo Eléctrico, pasando a través de un orificio					
Experimento (Spattering)					
Superficie Específica por técnica de adsorción					
Microscopio Electrónico					

## 1.2 Descripción de partículas sólidas.

Partícula es un estado de subdivisión de la materia cuya forma depende del proceso de su formación y de las fuerzas cohesivas que están presentes.

Una partícula puede ser un cristal, una gota de líquido o un material amorfo.

**Agregado.** Es una partícula o un ensamblaje de partículas que están sostenidas muy juntas por fuerzas inter o intramoleculares, o por fuerzas cohesivas atómicas.

Las dimensiones de un agregado sólido, son controladas por crecimiento del cristal, por fusión, etc., en cambio las dimensiones de un agregado fluido pueden ser disminuidas por emulsificación o aumentadas por floculación.

**Aglomerado.** Está compuesto por dos o más partículas y/o agregados que están sostenidos por fuerzas cohesivas relativamente débiles.

Los aglomerados pueden separarse por métodos de dispersión como fluidización o defloculación.

### Partícula Mínima

Partícula mínima o última, de una sustancia es el estado de menor subdivisión retiene las propiedades físicas y químicas de la sustancia.

**Tamaño.** El tamaño de una partícula es lo que mejor describe su grado de división, dependiendo de la geometría de la partícula. Por ejemplo, para una geometría esférica, el diámetro es la dimensión, en cambio para formas irregulares, el diámetro es la distancia entre dos puntos, sobre la superficie externa de la partícula, interceptando el centro de gravedad.

**Forma de la partícula.** Puede definirse como el cociente entre la superficie real o volumen de las partículas y el obtenido del tamaño medido.

**Esfericidad.** Es el cociente del área de superficie externa de una esfera de una partícula de volumen equivalente. Este cociente es realmente un factor de forma o sea la desviación de una partícula de la superficie esférica.

Porosidad <sup>(n)</sup>. Es el cociente del volumen de vacíos y el volumen total de la masa.

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

Relación de Vacíos <sup>(e)</sup>. Se define como la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos.

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

Grado de Saturación <sup>(s)</sup>. La relación existente entre el volumen de agua y el volumen de vacíos.

$$S = \frac{V_{\text{agua}}}{V_v}$$

La relación de vacíos se expresa como una relación; en cambio la porosidad y el grado de saturación, son normalmente expresados en porcentajes.

Formas de empaquetamiento.-

Las estructuras de un solo gránulo son el tipo más sencillo. Una acumulación de esferas iguales, tal y como si fuese una caja de bolas de billar completamente llena, es el prototipo ideal de la estructura de un solo gránulo. Este tipo de estructuras se observa en materiales en los cuales existe muy poca tendencia de adherirse unos con otros. Estos materiales son llamados sin cohesión y están representados en los suelos por las arenas y las gravas.

La porosidad de la masa granular puede variar dentro de límites muy amplios de acuerdo a la forma en la cual los gránulos se agrupan.

Los suelos granulares como las arenas, no son acumulaciones de esferas iguales. Sin embargo, los valores límites de la porosidad están cercanos a aquellos encontrados para el caso ideal. Dichos suelos casi tienen porosidades mayores de 50 o menores de 23%, correspondientes a relaciones de vacíos de 1 y 0.3 respectivamente.

DETERMINACION DE LA DISTRIBUCION DE TAMAÑO DE  
GRANULOS POR MEDIO DE TAMIZADO

Se puede hacer fácilmente un análisis mecánico para la determinación de la distribución de los tamaños de los gránulos de los materiales gruesos, pasando una muestra a través de un juego de cernidores y pesando las cantidades retenidas en cada tamiz o cernidor. El buen uso de un juego estandar de tamices bien hechos y en buen estado, dará resultados satisfactorios.

La malla más fina que es practicable es la conocida como la 200, con agujeros de 0.074 mm. Si la muestra que se va a analizar contiene una proporción grande de gránulos menores de este diámetro, el material más fino deberá ser estudiado por otros métodos por ejemplo: métodos de sedimentación; métodos de arrastre por el fondo). Como las partículas no pasan fácilmente por la malla 200 es necesario algunas veces lavar el material a través del tamiz.

Los resultados del análisis del tamaño de los gránulos son generalmente expresados en forma tabular, también en forma de histogramas, como curvas acumulativas o como distribución fraccional.

En muchos casos es conveniente hacer estas curvas de distribución sobre coordenadas semilogarítmicas, tal que la fracción masa apropiada es graficada como una del logaritmo del tamaño de la partícula. Estas curvas son hechas asumiendo que el material entre dos tamices tiene un diámetro de partículas que es el promedio aritmético de las aberturas de los dos tamices.

En el histograma, el eje vertical será la fracción masa de la muestra total entre dos mallas graficado contra la dimensión de la partícula o abertura.-

### 2.1 Tamizado.-

Es la separación por medio de tamices de una mezcla de granos de diversos tamaños en dos o más porciones.

Consiste en hacer pasar el material por una serie de mallas que tienen progresivamente aberturas menores, hasta obtener el tamaño deseado.

El material que queda sobre una malla es de mayor tamaño que las aberturas del mismo y se indica por más (+) del tamiz, el que pasa es menor que las aberturas y se indica por menos (-) del tamiz.

Por ejemplo la designación -10 + 14 significa partículas más pequeñas que malla 10 pero mayores que malla 14.

Otra designación es  $\frac{10}{14}$  ó " a través de malla 10 sobre malla 14".

## 2.2 Clasificación por tamaño.--

Es la operación de tamizar un material que contenga alrededor del 60% menor que las aberturas del tamiz.

Separación.-- Es la operación de tamizado en la que sólo pasa por el tamiz del 5 al 20% del material.

## 2.3 Tamices.--

Se construyen de tela de alambre (mallas).

Las dimensiones de la cazuela son 8 pulgadas de diámetro y 2 pulgadas de altura.

En los tamices para los granos más gruesos, el término malla indica la distancia entre dos alambres o varillas consecutivos o bien la distancia entre los ejes de dichos alambres o varillas.

En las telas de tamiz para los granos más finos, malla, significa el número de aberturas por pulgada lineal y generalmente se indica por malla/Pulg.

Ejemplo malla 20 x 20 pulgadas significa que en una malla N° 20 hay 20 aberturas en una pulgada.

## 2.4 Abertura o tamaño del tamiz.

Se define por la distancia mínima libre entre los bordes de la abertura del tamiz.

$$P = \frac{A_b^2}{(A_b + D)^2} = (1 - M.D)^2$$

...

$A_b$  = Abertura

D = diámetro del alambre en pulgadas.

M = # malla

Están relacionadas con el porcentaje de aberturas P.

Ejemplo: en una malla 10 hay 10 aberturas por pulgada.

Abertura = 0.10 pulgadas - Diámetro del alambre (10)

### 2.5 Normalización de la abertura de los tamices.-

En América son corrientes dos series

1) Escala Tyler Standard

2) United States Sieve Series (U.S.S.)

Una escala de tamices es una serie de tamices que van teniendo sucesivamente mayores o menores aberturas. Por ejemplo en la escala de tamices normalizada de Tyler cada tamiz tiene aberturas de lado  $\sqrt{2}$  veces mayor que el siguiente . (7)

La escala Tyler Standard está basada en el tamaño de abertura de la tela de alambre teniendo 200 aberturas por pulgada lineal (200 mesh).

El diámetro usado para el tamiz de 200 "mesh" es 0.0021 pulgadas (0.053 mm) y la abertura es 0.0029 pulgadas (0.074 mm).

La razón entre tamaños, de la escala está basada sobre  $\sqrt{2}$  y en la U.S.S. sobre  $\sqrt[4]{2}$  para trabajos más precisos.

La W.S. Tyler Co. de la fórmula siguiente para el rendimiento del tamiz:

$$R = 100 (c - a)/(b)(c)$$

R = fracción o tanto por ciento de los finos recuperados en el tamizado

E = porcentaje de finos recuperados en el tamizado

a = porcentaje de gruesos en la alimentación o material que se tamiza

b = porcentaje de finos en la alimentación o material que se tamiza

c = porcentaje de gruesos en el sobretamaño después del tamizado.

.....

Otra fórmula es la propuesta por Taggart en su "Handbook of Mineral Dressing"

$$E_T = 100 (U - O) / U(100 - O)$$

$E_T$  = rendimiento del tamiz.

U = porcentaje del subtaño en la alimentación

O = porcentaje del subtamaño en el sobretamaño del tamiz (o sea en lo que no ha pasado por el tamiz).

La "United States Sieves Series" propuesta por "The National Bureau of Standards" tiene igual razón que la "Tyler" pero difiere porque está basada sobre una abertura de 1 mm. (18 mesh). (10)

Hay otra serie adoptada por la "British Standards Institution" y es conocida como la "British Standards Sieve Series" usada por Inglaterra desde 1932.

La razón entre tamaños es igual que para la U.S.S. y la Tyler, habiendo ligera diferencia en la abertura debido a que los alambres normalizados no son tan iguales

En Alemania se usa una serie de tamiz conocida como "DIN N° 1171" es designada por número y también por el número de mallas por cm<sup>2</sup>.

En Francia se usa una serie similar conocida como AFNOR.

Propósitos del tamizado.-

Entre los propósitos en Ingeniería Química de efectuar un tamizado están:

- 1) Separar por tamizado previo los granos más gruesos en que hay gran variación de tamaños para su reducción posterior.
- 2) Separar los granos más finos de las alimentaciones del triturador para economizar así energía e impedir una molienda excesiva.
- 3) Graduar los productos dentro de los tamaños comerciales.
- 4) Realizar una etapa en un proceso de concentración.

2.7 Variables del material que se tamiza.

Entre las más importantes están:

Densidad específica a granel, tamaño de la separación, adherencia del material, forma del material, distribución por tamaño de las partículas.



Los materiales de poco peso a granel se tamizan con eficiencia en tamices oscilatorios.

Para el tamizado con mallas muy finas, se utilizan tamices vibratorios de alta frecuencia.

Cuando el agitador de tamiz da un movimiento de rotación horizontal, la eficiencia es mayor que en los otros tipos de agitadores.

$$\text{eficiencia} = \frac{\% \text{ material realmente pasando}}{\% \text{ material capaz de pasar}}$$

El tiempo de agitado es fijo generalmente de 10 a 20 minutos. Las mallas son removidas y las fracciones retenidas separadas y pesadas.

A medida que el tamiz se va tapando la eficiencia disminuye, cuando los sólidos son pegajosos (viscosos) el problema es mas severo.

Puede tamizarse satisfactoriamente algunos materiales cuando son expuestos a lavado con algún líquido no-solvente, en esta forma aumentando grandemente la eficiencia del tamiz.

SECCION 3.

REPRESENTACIONES TÍPICAS DEL ANALISIS DE TAMIZADO

3.1 Tabla N° 1. Tamaño normalizado de algunas mallas tipo Tyler (2)

N° del Tamiz	Aberturas en pulgadas aproximada mente, equivalentes.
3	0.263
4	0.185
8	0.093
14	0.046
28	0.0232
35	0.0164
48	0.0116

La malla N° 3 tiene una abertura de 0.263 pulgadas y la malla N° 4 tiene una abertura de 0.185 pulgadas, entonces el tamaño de la partícula en la fracción -3+4 mallas, será el promedio aritmético entre las dos aberturas.

$$\bar{D}_p = \frac{D_{P_3} + D_{P_4}}{2} = \frac{0.263 + 0.185}{2} = 0.224$$

La fracción retenida ó % peso =  $\frac{\text{gms } A}{\text{gms totales}} \times 100$

3.1.1 Tabla N° 2 Datos experimentales

Material empleado: arena de mina

Lugar de origen : Aramunca (San Miguel)

Base tomada : 159.6 gms.

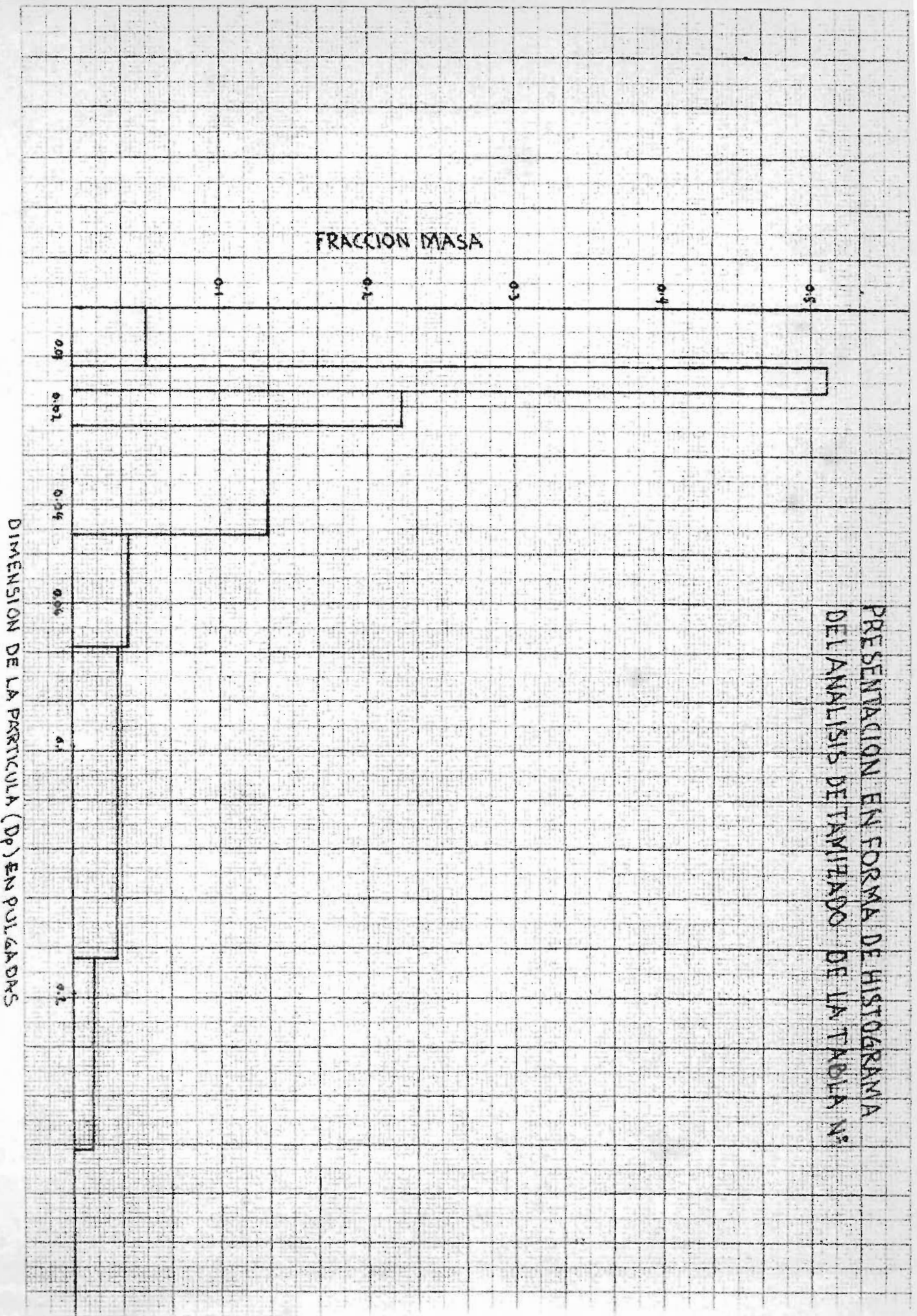
U. S. Tyler N° de Malla	Masa Retenida (Peso en gms.)	Fración Masa Retenida. % Peso.	Diámetro de la Partícula ( $\bar{D}_p$ ) en pulgadas.
- 3 + 4	2.60	1.62	0.224
- 4 + 8	4.60	2.88	0.139
- 8 + 14	5.10	3.20	0.0695
-14 + 28	22.00	13.78	0.0346
-28 + 35	37.20	23.30	0.0198
-35 + 48	80.00	50.12	0.0140
-48	8.10	5.10	0.0058
	159.6	100	

3.1.2 TABLA N° 3. DISTRIBUCION ACUMULATIVA Y CALCULOS DE  $\bar{D}_p^2$  y  $\bar{D}_p^3$

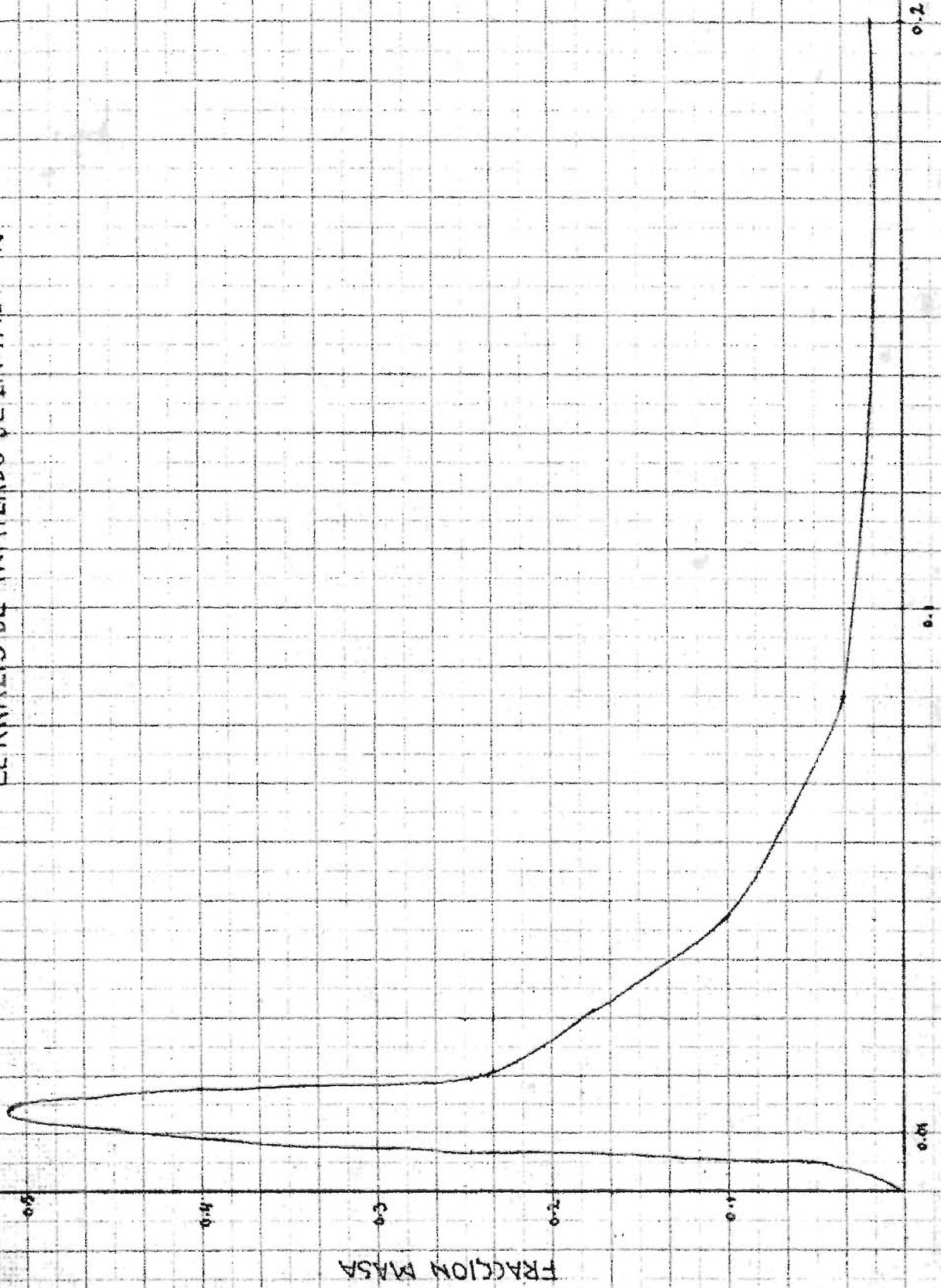
EN FORMA TABULAR.

N° Malla	% Peso	Rechazo Acumulado.-	Cernido Acumulado.-	$\bar{D}_p$	$(\bar{D}_p)^2$	$(\bar{D}_p)^3$
- 3 + 4	1.62	0.0162	0.9838	0.224	0.05018	0.01124
- 4 + 8	2.88	0.0450	0.9550	0.139	0.01932	0.00268
- 8 + 14	3.20	0.0770	0.9230	0.0695	0.00483	0.00033
-14 + 28	13.78	0.2148	0.7852	0.0346	0.00119	0.00051
-28 + 35	23.30	0.4478	0.5522	0.0198	0.00039	0.00007
-35 + 48	50.12	0.9490	0.0510	0.0140	0.00019	0.000003
-48	5.10	1.0000	0.0000	0.0058	0.00003	0.0000002

PRESENTACION EN FORMA DE HISTOGRAMA  
DEL ANALISIS DE TAMIZADO DE LA TABLA N°



CURVA DE DISTRIBUCION FRACCIONAL PARA  
EL ANALISIS DE TAMIZADO DE LA TABLA N°



DIAMETRO PROMEDIO DE LA PARTICULA  $(D_p = \frac{(D_p)_2 - (D_p)_1}{2})$ , PULGADAS

3.2 Cálculos del diámetro promedio (3)

3.2. 1) Basado en la longitud

$$D_{P_L} = \frac{\sum \frac{X}{\bar{D}_p^2}}{\sum \frac{X}{V_p^3}}$$

3.3. 2) Basado en la masa

$$D_{P_m} = \left( \frac{1}{\sum \frac{X}{\bar{D}_p^3}} \right)^{1/3}$$

3.2. 3) Basado en la superficie por unidad de volumen

$$D_{P_v} = \frac{\sum X \bar{D}_p^3}{\sum X \bar{D}_p^2}$$

X = fracción masa retenida

$D_p$  = Diámetro promedio

$\bar{D}_p^2$  = Cuadrado del promedio aritmético entre dos aberturas

$\bar{D}_p^3$  = Cubo del promedio aritmético entre dos aberturas

$$\begin{aligned}
& \frac{1.62 \times 10^{-2}}{50.18 \times 10^{-3}} + \frac{2.88 \times 10^{-2}}{19.32 \times 10^{-3}} + \frac{3.20 \times 10^{-2}}{4.83 \times 10^{-3}} + \frac{13.78 \times 10^{-2}}{1.10 \times 10^{-3}} + \frac{23.30 \times 10^{-2}}{0.39 \times 10^{-3}} + \frac{50.12 \times 10^{-2}}{0.19 \times 10^{-3}} + \frac{5.10 \times 10^{-2}}{0.03 \times 10^{-3}} \\
& \frac{1.62 \times 10^{-2}}{11.24 \times 10^{-3}} + \frac{2.88 \times 10^{-2}}{2.68 \times 10^{-3}} + \frac{3.20 \times 10^{-2}}{0.33 \times 10^{-3}} + \frac{13.78 \times 10^{-2}}{0.51 \times 10^{-3}} + \frac{23.20 \times 10^{-2}}{0.07 \times 10^{-3}} + \frac{50.12 \times 10^{-2}}{0.003 \times 10^{-3}} + \frac{5.10 \times 10^{-2}}{0.0002 \times 10^{-3}}
\end{aligned}$$

$D_{P_L}$

$$\left( \frac{1.62 \times 10^{-2}}{11.24 \times 10^{-3}} + \dots + \frac{1}{1} + \dots + \frac{5.10 \times 10^{-2}}{0.0002 \times 10^{-3}} \right)^{1/3}$$

$D_{P_m}$

$$\begin{aligned}
& = \frac{(1.62 \times 10^{-2} \times 11.24 \times 10^{-3}) + (2.88 \times 10^{-2} \times 2.68 \times 10^{-3}) + \dots + (5.10 \times 10^{-2} \times 0.0002 \times 10^{-3})}{(1.62 \times 10^{-2} \times 50.18 \times 10^{-3}) + \dots + (5.10 \times 10^{-2} \times 0.03 \times 10^{-3})}
\end{aligned}$$

$D_{P_v}$



SECCION 4.

ENSAYOS DE ACREGADO FINO (ARENA)

4.1 Método Estandar de prueba para densidad.

Aparatos.

- a) Balanza teniendo una capacidad de 1 kg o mas y sensitiva hasta 0.1 gm o menos.
- b) Probeta volumétrica calibrada hasta 0.15 ml o menos

Preparación de la muestra.

Colocar aproximadamente 1000 gms. seleccionados de la muestra por el método de cuarteo, en una cazuela o vasija disponible, secar a peso constante a una temperatura de 100 a 110°C, agregar H<sub>2</sub>O y dejar reposar 24 horas.

Poner la muestra en una bandeja y hacer que pase una corriente de aire para que se seque bien.

Procedimiento.

Llenar la probeta con H<sub>2</sub>O hasta una marca determinada, (la cual podría ser 500 ml) luego introducir en la probeta una cantidad pesada de muestra, eliminar las burbujas de aire, luego asentar bien la muestra por medio de ligeros golpes a la probeta, observando el volumen que se ha desplazado.

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Peso en gramos de la muestra seca}}{\text{Volumen desplazado en ml.}}$$

Hágase en duplicado.

Determinación de la densidad.

Material usado : Arena de mina  
Lugar de origen : Aramuaca (San Miguel)  
Peso de la muestra : 60.7 gm  
Número de malla : -8 + 10 mesh  
Vol. de desplazamiento : 25 ml

$$\rho = 2.43 \text{ gm/ml.}$$

#### 4.2 Determinación del % vacíos aparentes.

##### Aparatos.-

- a) Balanza con capacidad de 1 kg o mas y sensitiva hasta 0.10 gm o menos.
- b) Seis probetas calibradas hasta 0.15 ml o menos
- c) Seis tamices (del número 4 al 16 "U.S. Tyler")

##### Procedimiento.-

Llenar la probeta con H<sub>2</sub>O, hasta una marca determinada, introduciendo una cantidad pesada de muestra en cada una de las seis probetas (la muestra debe ser de igual número de malla). Observar la cantidad de H<sub>2</sub>O desplazada, eliminar las burbujas de aire, por medio de ligeros golpes en la probeta, hasta que la muestra sedimente. Observar el volumen desplazado.

##### Objeto de usar diferentes probetas.-

A determinadas capacidades de las probetas corresponden diferentes diámetros.

Se usaron probetas con diámetros mucho menores que el de la cámara de flujo y también mayores. Para poder graficar el % vacíos vrs el diámetro y así encontrar el porcentaje de vacíos en la cámara de flujo para diferente número de malla.

#### 4.3

Capacidad de la probeta en ml.	Diámetro en Pulgadas.-
25	0.71
50	0.85
100	1.00
250	1.36
500	1.75
1000	2.40

Ejemplo:

% Vacíos - 4 + 6 "mesh"  
Probeta de 50 ml.  
Volumen H<sub>2</sub>O = 25 ml.  
Peso de la arena = 33 gms  
Vol. H<sub>2</sub>O + Vol. arena = 39 ml  
Volumen real de la arena = 14 ml (vol. de despalzamiento)  
Volumen arena + Vol. Vacíos = 30 ml  
Volumen vacíos = 16 ml

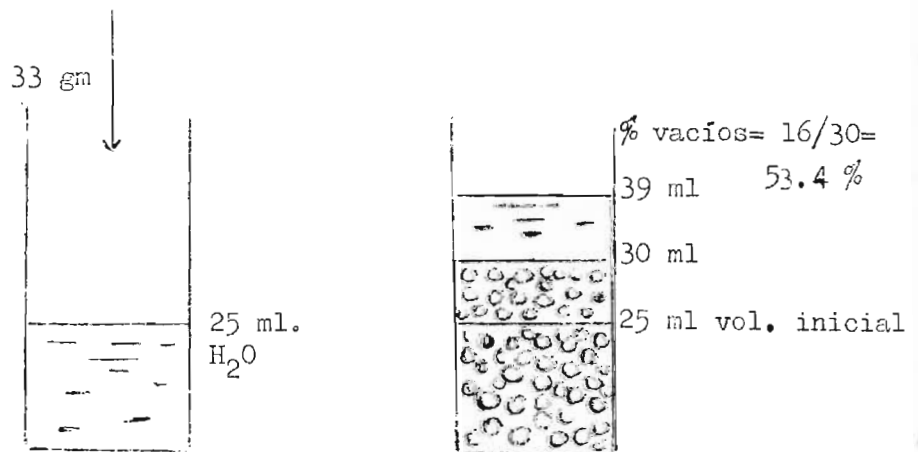


Fig. 1.

TABLA N° 4 DATOS EXPERIMENTALES FRACCION -- 4 + 6

Capacidad de la probeta en ml.	Gramos de Arena.	Vol. (Agua + Arena). ml.	Volumen de Agua ml.	Vol. (Arena + Vacios) ml.	Volumen Vacios ml.	% Vacios Aparentes.
25	10	14.3	10	9.5	5.2	54.8
50	33	39.0	25	30.0	16.0	53.4
100	56	74.0	50	50.0	26.0	52.0
250	107.8	135.4	90	90.0	44.6	49.6
500	116.1	151.0	100	100.0	49.0	49.0
1000	337.55	455.0	300	300.0	145.0	48.4

TABLA N° 5. DATOS EXPERIMENTALES FRACCION -6 + 8

Capacidad de la probeta en ml.	Gramos de Arena	Volumen de Agua + Arena ml.	Vol. Agua ml.	Volumen de Arena + Va cíos.	Vol. Va cíos. ml.	% Vacíos Aparen-tes.
25	11.1	14.7	10	10	5.3	53.0
50	21.45	30.0	20	20	10.3	50.0
100	58.90	75.7	50	50	24.3	48.6
250	106.64	135.0	90	90	45.0	50.0
500	121.50	153.0	100	100	47.0	47.0
1000	365.8	463.0	300	300	137.0	45.6

TABLA N° 6 DATOS EXPERIMENTALES FRACCION - 8 + 10

Capacidad de la probeta en ml.	Gramos de Arena	Volumen de Agua + Arena ml.	Vol. Agua ml.	Volumen de Arena + Va cíos.	Vol. Va cíos. ml.	% Vacíos Aparen-tes.
25	12.3	15.0	10	10	5.0	50.0
50	24.6	30.3	20	20	9.7	48.5
100	61.28	76.2	50	50	23.8	47.5
250	112.9	136.5	90	90	43.5	46.7
500	125.6	152.0	100	100	48.0	48.0
1000	372.4	155.0	100	100	45.0	45.0

4.3.3

4.3.4

TABLA N° 7. DATOS EXPERIMENTALES FRACCION -10 + 12

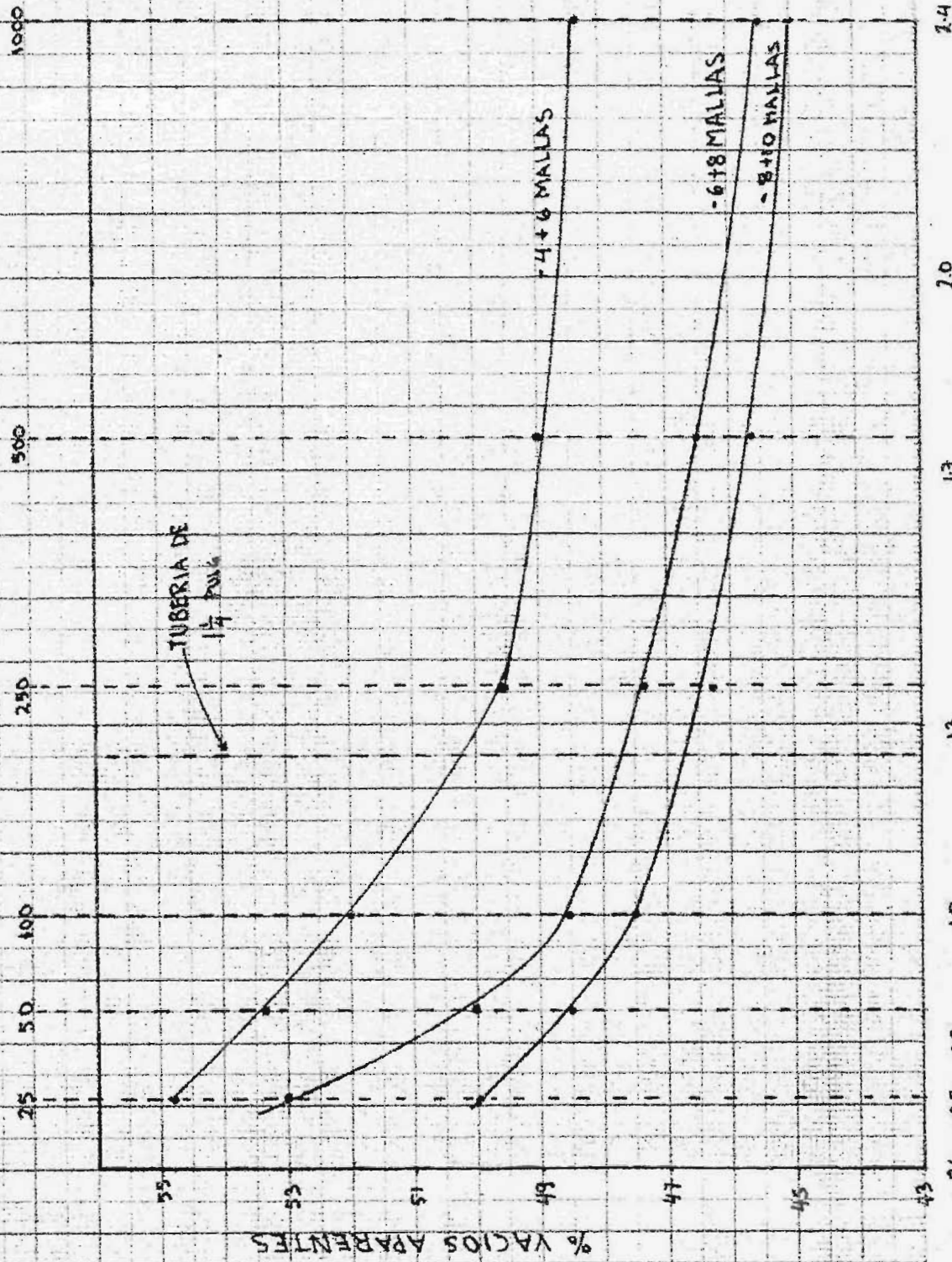
Capacidad de la Probeta en ml.	Gramos de Arena.	Vol. de (Agua + Arena.) ml.	Volumen de Agua ml.	Volumen de Arena + Vacíos. ml.	Volumen Vacíos ml.	% Vacíos Aparentes
25	12.3	15.0	10	10	5.0	49.5
50	24.7	30.5	20	20	9.5	47.5
100	62.9	76.5	50	50	23.5	47.0
250	117.2	138.2	90	90	41.8	46.4
500	127.1	155.0	100	100	45.0	45.0
100	388.2	308.0	200	200	92.0	43.6

4.3.5

TABLA N° 8. DATOS EXPERIMENTALES FRACCION - 12 + 14

Capacidad de la Probeta en ml.	Gramos de Arena	Vol. de (Agua + Arena.) ml.	Volumen de Agua ml.	Volumen de (Arena + Vacíos) ml.	Volumen Vacíos ml.	% Vacíos Aparentes.
25	12.8	15.1	10	10	4.9	49.0
50	26.1	30.5	20	20	9.5	47.5
100	66.7	76.5	50	50	23.5	47.0
250	118.9	138.0	90	90	42.0	46.6
500	134.7	155.0	100	100	45.0	45.0
1000	400.4	468.0	300	300	132.0	44.0

# GRADUACION DE LA PROBETA - ML.



DIAMETRO DE LA PROBETA - PULGADAS

2.4

2.0

1.7

1.3

1.0

0.8

0.6

% VACIOS APARENTES

1000

500

250

100

50

25

TUBERIA DE  
1 1/4 PULG.

-4+6 MALLAS

-6+8 MALLAS

-8+10 MALLAS

## SECCION 5.

### CONCEPTO Y CLASIFICACION DE FLUJO

Un fluido es ideal cuando no encuentra oposición a su trayectoria (no tiene viscosidad), para problemas de Ingeniería es algunas veces útil esta su posición.

Los fluidos pueden ser también compresibles e incompresibles tratándose generalmente a los gases como compresibles y a los líquidos como incompresibles.

El flujo de fluidos líquidos tiene dos estados en su movimiento:

- 1) En el flujo laminar cada partícula se desplace en una trayectoria definida la cual nunca intercepta la trayectoria de otra partícula.



Fig. 2.

En un determinado momento una partícula en "O" puede moverse con una velocidad OD.

- 2) En el flujo turbulento (existe viscosidad) las trayectorias son indefinidas, irregulares, se cruzan al azar, o sea pues, cambian continuamente en dirección y en magnitud.

Las fluctuaciones en velocidad van acompañadas por variaciones en presión.

#### 5.1 Flujo Estable.

Todas las condiciones en cualquier punto permanecen constantes con respecto al tiempo, pero las condiciones pueden cambiar en diferentes puntos.



### 5.2 Flujo Uniforme.-

Si en un instante dado la velocidad permanece constante con respecto a la distancia a lo largo de una trayectoria (líneas de corriente), el flujo es uniforme.

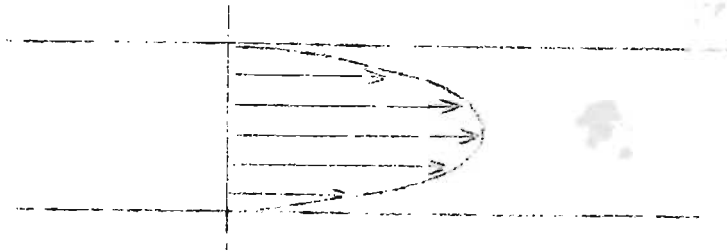


Fig. 3.

### 5.3 Velocidad de descarga.-

El volumen de fluido descargado por unidad de tiempo se le conoce con el nombre de velocidad de descarga, también llamado flujo volumétrico.

$$Q = V A$$

$Q$  = Flujo volumétrico o velocidad de descarga, pies<sup>3</sup>/seg.

$V$  = velocidad promedio sobre el área  $A$ , pies/seg.

### 5.4 Ecuación de continuidad (1)

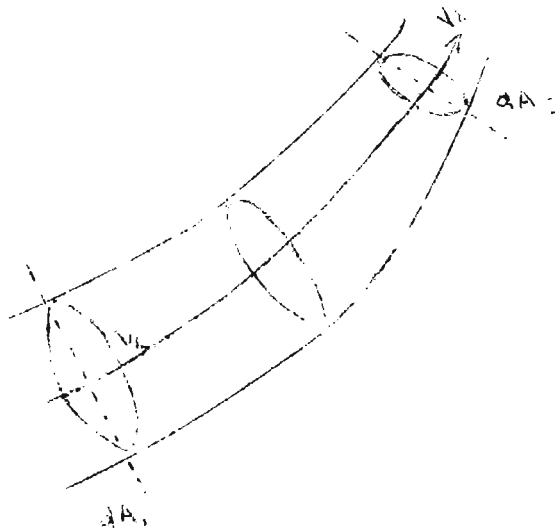


Fig. N° 4.

Expresada matemáticamente la ley de conservación de la masa para el tubo de corriente es:

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta T} = \frac{\Delta m_2}{\Delta T} = \frac{\Delta m_3}{\Delta T} = \text{constante}$$

En la cual  $m$  es la masa del fluido pasando a través de las secciones 1 y 2 del tubo de corriente en la Fig. 4 durante el intervalo de tiempo  $T$ . Cuando  $T$  se aproxima a cero, la ecuación toma forma diferencial.

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta T} = \frac{dm_1}{dt} = \frac{dm_2}{dt} = \text{constante}$$

Si se integra esta ecuación el resultado es que la masa total del fluido pasando a través de cualquier sección transversal del flujo total en un período de tiempo dado es igual a la masa total pasando a través de cualquier otra sección transversal en igual período de tiempo.

El volumen del fluido pasando una sección transversal  $dA$  del tubo de corriente en un período unitario de tiempo  $dt$  es:

$$\begin{array}{l} \text{Volumen por unidad} \\ \text{de tiempo} \end{array} = \left( \frac{ds}{dt} \right) \cdot dA = V dA$$

$$dQ = V dA$$

$V$  = velocidad promedio

$dA$  = área diferencial

El flujo de masa ( $W$ ) es igual a través de cualquier sección

$$dW = \rho_1 V_1 dA_1 = \rho_2 V_2 dA_2 = \text{constante}$$

$\rho_i$  = densidad del fluido en una sección determinada.

## SECCION 6.

### HIDROSTATICA EN SUELOS

Cuando un fluido está en equilibrio estático, cada porción del fluido separadamente, está en equilibrio bajo la acción de fuerzas debidas al cuerpo y a la superficie.

Las fuerzas del cuerpo son en general debidas a la gravedad; y las fuerzas de superficie, son fuerzas de presión normal a la frontera de la porción, como esfuerzos de corte que desaparecen en el fluido que permanece estático.

La hidrostática del agua en suelos obedece las mismas reglas.

El agua está en un estado hidrostático cuando:

- a) la fase líquida es continua y está en equilibrio verdadero.
- b) los poros no son demasiado pequeños, tal que no hay efecto interfacial apreciable (capilaridad).

Si el líquido no es continuo el equilibrio puede ser establecido por la transferencia de vapor.

Si los poros son muy pequeños el agua puede comportarse como un fluido no-Newtoniano, por ejemplo, cuando él forma con arcilla coloidal una gel de resistencia inicial al corte.

#### 6.1 Ley básica de la Hidrostática.-

En fluidos de densidad constante, en cada punto tenemos:

$$\phi = P/\gamma + Z = \text{constante}$$

- $\phi$  = Carga piezométrica (L), [pies]
- P = Carga hidrostática ( $F L^{-2}$ ), [lbf/pie<sup>2</sup>]
- $\gamma$  = Peso unitario de líquido ( $F L^{-3}$ ) [lbf/pie<sup>3</sup>]
- $\frac{P}{\gamma}$  = Carga de presión (L), [pies]
- Z = Elevación arriba del nivel (algún nivel de referencia, dim.L), [pie]

La presión es usualmente expresada como presión relativa  $p$  con referencia a la presión atmosférica  $P_o$ . Presión absoluta se refiere a vacío.

$$p = P_{abs} - P_o$$

Cuando  $P_{abs} < P_o$  significa que:

$$p = P_{abs} - P_o < 0 \text{ es negativa}$$

Una presión negativa puede definirse como:  $\Pi = -p = P_o - P_{abs}$  también es llamada, presión deficiente, succión, capilaridad potencial o tensión. Pero estos nombres no son recomendados.

## 6.2 Ley de Darcy para flujo a través de suelos.

Los poros de casi todos los suelos son tan pequeños que el flujo a través de ellos es laminar.

Sin embargo, en suelos altamente gruesos el flujo puede ser turbulento.

El flujo que se desea conocer es el flujo combinado a través de todos los poros de un elemento cuyo volumen sea lo suficientemente grande para ser representativo.

La ley de flujo a través del suelo es nombrada Ley de Darcy.

Darcy investigó en filtros verticales de arena.

...

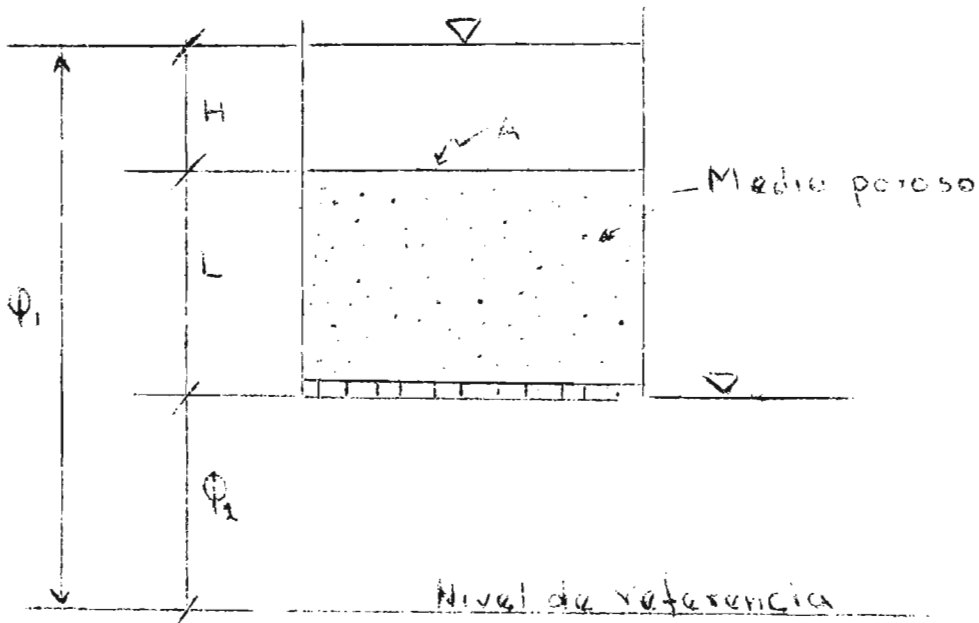


Fig. N° 5

$$\phi = K A J = K A (\phi_1 - \phi_2)/L$$

$$q = Q/A = K (\phi_1 - \phi_2)/L ;$$

$Q$  = Volumen de descarga del filtro de arena de longitud  $L$  y área seccional  $A$ .

$J$  = Gradiente hidráulico debido a la carga (o pérdida de carga llamada también pérdida de carga efectiva), adimensional.

$$h = \phi_1 - \phi_2 ,$$

$A$  = Area total de la sección transversal de una masa de suelo, a través de la cual pasa un gasto  $Q$ . ( $L^2$ ), pies<sup>2</sup>.

$K$  = Coeficiente de permeabilidad de Darcy, llamado simplemente permeabilidad (dim.  $LT^{-1}$ ), pie/seg.

$q$  = Flujo específico o descarga específica ( $LT^{-1}$ ) pie/seg.

Este coeficiente de permeabilidad es formalmente llamado conductividad hidráulica, depende tanto de la matriz porosa (suelo) como del fluido (agua).

K puede ser definido como la velocidad del flujo a través de una sección transversal unitaria normal al flujo bajo un gradiente unitario.

Observamos que "q" es una velocidad superficial

$$q = q_a = q_d \quad \begin{array}{l} q_a = \text{velocidad de entrada} \\ q_d = \text{velocidad de descarga} \end{array}$$

$$\begin{aligned} A_{\text{total}} &= A_{\text{sólidos}} + A_{\text{vacíos}} \\ \% \text{ Vacíos} &= \frac{A_{\text{vacíos}}}{A_{\text{sólidos}}} \times 100 \end{aligned}$$

$$K = q/J \quad (\text{velocidad superficial/unidad de gradiente})$$

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

La fórmula de Darcy es esencialmente una relación lineal entre q y j la cual es aproximadamente verdadera en valores bajos de q en flujo viscoso o laminar.

El flujo es reducido (o que es pequeño) cuando el parámetro adimensional llamado número de Reynolds es

$$N_{Re} = q d / \nu = K d j / \nu < 1 \text{ a } 10$$

d = es el diámetro del grano efectivo o equivalente (L)

$\nu$  = viscosidad cinemática ( $L^2/T$ ) =  $\frac{\mu}{\rho}$

$N_{Re}$  = parámetro adimensional usado para describir el régimen de flujo.

$$j = \dot{W} q \quad \dot{W} = 1/K$$

$\dot{W}$  = resitividad hidráulica ( $L^{-1} T$ )

K es usualmente determinada experimentalmente en un PERMEAMETRO, conteniendo una muestra de suelo.

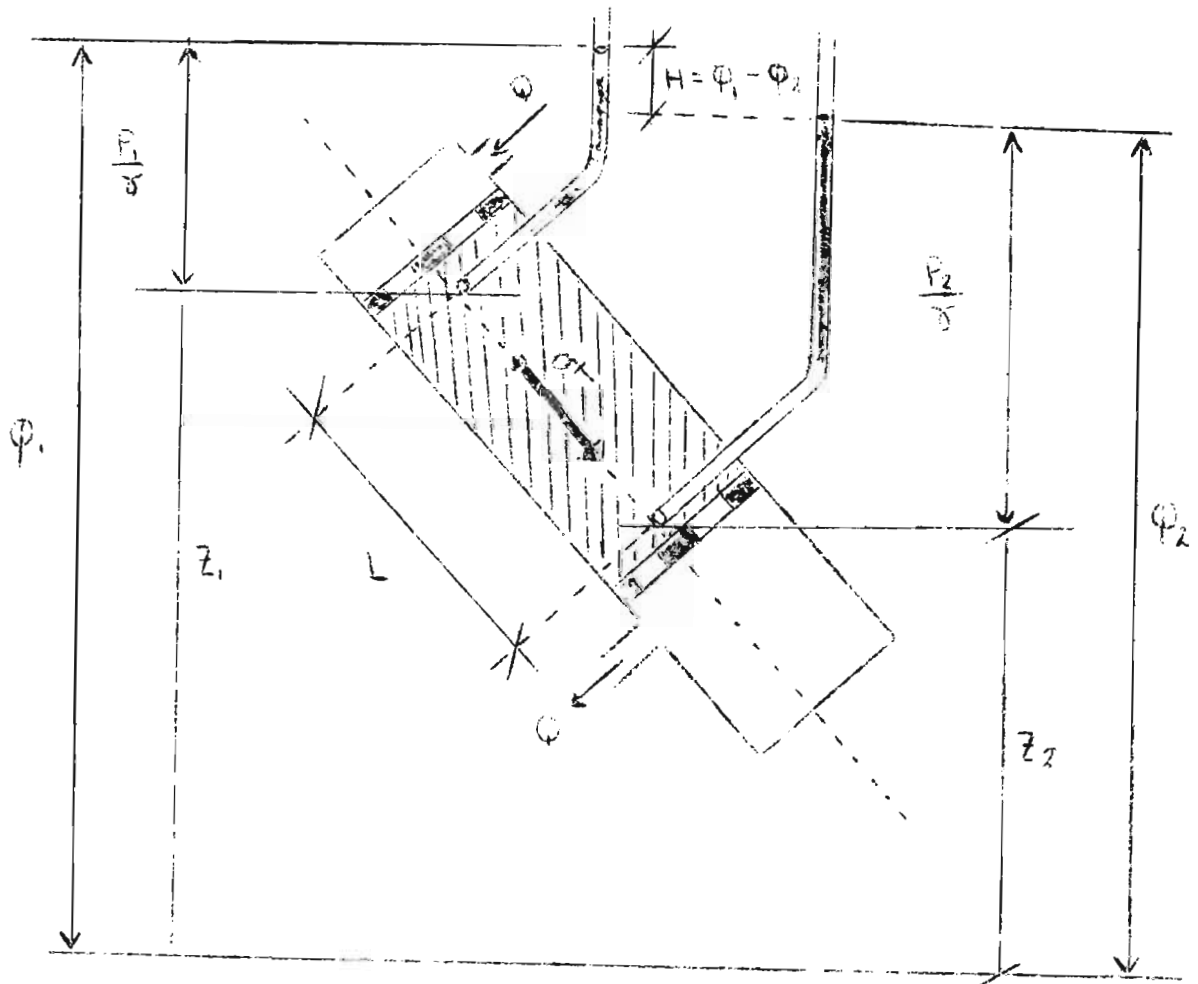


Figura N° 6

La descarga total  $Q$  es mantenida constante. Teóricamente no tiene ninguna importancia si el agua entra en el tope y sale por el fondo o viceversa.

...

Las cargas  $\phi_1$  y  $\phi_2$  son medidas por dos piezómetros 1 y 2, insertados en el suelo en dos puntos de elevación  $Z_1$ ,  $Z_2$  y las presiones  $P_1$ ,  $P_2$ ; una distancia  $L$  entre las secciones 1 y 2.

$$j = (\phi_1 - \phi_2)/L = (Z_1 - Z_2)/L + (P_1 - P_2)/\gamma L$$

Aplicando Ec. Darcy en un filtro vertical

$$Z_1 - Z_2 = L; \quad P_1 - P_2 = \gamma H - 0 = \gamma H$$

$$\phi_1 - \phi_2 = L + H$$

$$j = (\phi_1 - \phi_2)/L = 1 + H/L > 1$$

$$Z_1 - Z_2 = 0 \quad \phi_1 - \phi_2 = P_1 - P_2/\gamma$$

### 6.3 Factores que afectan la permeabilidad.

En la forma más simple se asume que  $K$ , es independiente del tiempo espacio, dirección, del flujo específico  $q$ , del gradiente hidráulico  $j$ , de la presión  $p$ , longitud  $L$ , y del área seccional  $A$  del permeámetro.

En general  $K$  depende de muchos factores:

- a) Puede variar de punto a punto, o sea por ejemplo: en suelos heterogéneos (no-uniformes) o cuando el fluido es heterogéneo por ejemplo: debido a variaciones de temperaturas, salinidad, composición y miscibilidad con otros líquidos, lo cual afecta su densidad, viscosidad o interacción con la matriz porosa.
- b) puede variar en cada punto de dirección a dirección como en suelos anisotrópicos.
- c) puede depender de la concentración y presión del fluido como en un flujo no saturado o sobre su densidad como en el flujo de gases compresibles.



d) puede variar en el tiempo o debido a flujo prolongado, como en un medio poroso, geométrico, físico y químicamente inestable, de textura, de cambio y estructura.

K puede ser afectado también por actividad biológica de microorganismos.

e) Cuando el número de Reynolds no es pequeño:

$$N_{Re} = q d / \nu = K d j / \nu > 1 \text{ a } 10$$

d es el diámetro del grano, efectivo o equivalente, el cociente  $q/j$  aumenta con  $q$ .

#### 6.4 Concepto de radio hidráulico en los poros del suelo

Cuando el flujo se efectúa a través de una masa porosa, el volumen de los canales de flujo es el volumen de los poros (volumen ocupado por los vacíos) el cual se expresa:

$$V_c = e V_s$$

$$V_c = \text{volumen del permeámetro, pies}^3$$

$$e = \text{relación de vacíos, adimensional}$$

$$V_s = \text{volumen de sólidos, pies}^3$$

$$r_H = \text{radio hidráulico, pies}$$

Entonces el radio hidráulico en suelos será:

$$r_H = e V_s / A_s$$

$$A_s = \text{área de los sólidos en el permeámetro.}$$

Donde la relación  $\frac{V_s}{A_s}$  es constante para cualquier muestra de suelo.

El volumen del canal puede también ser expresado como:

$$V_c = (\epsilon / 1 - \epsilon) N V_p$$

$\epsilon$  = Porosidad del lecho = Vol. vacíos/Vol. total = adimensional

...

$N$  = Número de partículas en el lecho.

$V_p$  = volumen de una sola partícula, ( $L^3$ ), pies<sup>3</sup>

La superficie mojada total puede ser considerada que es igual al área de superficie de los sólidos.

Área de superficie mojada =  $N S_p$

$S_p$  = área de superficie de una sola partícula, pies<sup>2</sup>.

Entonces el radio hidráulico quedará:

$$r_H = (\epsilon / 1 - \epsilon) V_p / S_p$$

La relación  $V_p / S_p$  para gránulos esféricos puede expresarse como:

$$V_p / S_p = \frac{(1/6)\pi D_p^3}{\pi D_p^2} = D_p / 6$$

$D_p$  = diámetro de la partícula en, pie, (L)

$$r_H = \epsilon (D_p / 6) = \epsilon (D_s / 6)$$

Cuando las partículas son no-esféricas introducimos un factor de forma.

$$V_p / S_p = \phi_s (D_p / 6)$$

$$r_H = \phi_s (D_p / 6)$$

$\phi_s$  = factor de forma de las partículas, adimensionales.

La relación entre la velocidad promedio en la cual el fluido fluye a través de los vacíos y la velocidad superficial en la cual él deberá fluir en el lecho cuando está vacío.

...

$$\bar{V} = \bar{V}_s / \epsilon$$

$\bar{V}_s$  = velocidad superficial promedio, pie/seg.

$\bar{V}$  = velocidad promedio del fluido a través de los canales, pie/seg.

### 6.5 Ecuación de Karman-Kozeny (11)

Sirve para calcular las pérdidas debidas a la fricción a través de un lecho de sólidos.

$$h_f = (f/4) (L/r_H) (\bar{V}^2/2gc)$$

$h_f$  = pérdidas friccionales de carga (pie)(lbf)/(lbm)

$f$  = factor de fricción adimensional

$L$  = longitud del lecho, pie.

$gc$  = factor de conversión de Newton, pie-lbm/lbf-sec<sup>2</sup>

Usaremos ahora factor de fricción modificado y también  $N_{Rc}$  modificado.

$$hf = f^1 (L/\phi_s D_p) (1 - \epsilon/\epsilon^3) (\bar{V}_s^2/gc)$$

$$f^1 = 150(1 - \epsilon) / N_{Rc} + 1.75$$

$$N_{Rc} = \phi_s D_p \bar{V}_s \rho / \mu$$

Cuando las partículas son de diferentes diámetros

$$D_p = (6/\phi_s) (NV_p/NS_p) = (6/\phi_s)(V/A)$$

$N$  = número de partículas en el lecho

$V$  = Vol. total de partículas en pies<sup>3</sup>

$A$  = Area de superficie total de partículas, pies<sup>2</sup>

$$hf = f^1 (L/6) (A/V) (1 - \epsilon/\epsilon^3) (\bar{V}_s^2/gc)$$

En términos de área-volumen para partículas de tamaño mixto, puede ser evaluado por:

$$(A/V)_{\text{promedio}} = (6/r'_s) \sum_{i=1}^i X_i/D_p, i$$

$X_i$  = fracción peso de partículas de tamaño  $D_p, i$

$i$  = número de la fracción peso en la mezcla. Cuando un análisis de tamizado es usado para determinar  $(A/V)_{\text{promedio}}$ , el término  $X_i$  representa la fracción por peso de las partículas retenidas entre tamices adyacentes.

El valor correspondiente de  $D_p, i$  se toma como el tamaño promedio de las dos aberturas del tamiz.

Tabla N° 10 Factores de forma para partículas no-esféricas (11)

	Naturaleza del Grano.	$\phi_s$
Vidrio quebrantado		0.65
Carbón pulverizado		0.73
Polvo de carbón natural (hasta 3/8 pulgada)		0.65
Escama (pedacitos) de mica		0.28
Arena, promedio para varios tipos.		0.75
Arena dura (pedernal)		0.66
Arena dura (pedernal)		0.43
Arena	redondeada	0.82
Arena	angular	0.73

Se quiere calcular los factores de forma para diferentes formas geométricas.

$$\phi_s = 4.90 \left[ (V_p)^{2/3} / S_p \right]$$

$V_p$  = volumen de una sola partícula, pies<sup>3</sup>

$S_p$  = Area de superficie de una sola partícula, pies<sup>2</sup>

### 6.6 Ecuación de Rose.-

Tiene su aplicación directa en la hidráulica de los filtros de arena rápidos.

$$h_f = f'' (L/\phi_s D_p) (1/\epsilon^4) (\bar{v}_s^2 / gc)$$

$f''$  = factor de fricción adimensional

$L$  = espesor del lecho, pie

$D_p$  = diámetro de la partícula, pie

$h_f$  = pérdida de carga debida a la fricción a través del lecho

$$f'' = 1.067 C_D$$

$C_D$  = coeficiente de draga, adimensional

esto puede verse en el Manual I. Químico, Gráfica  $C_D$  vrs  $N_{Re}$ . (10)

$$N_{Re} = \frac{\phi_s D_p \bar{v}_s}{\mu}$$

$\phi_s D_p$ , se encuentra un valor promedio, cuando hay mezcla de diferentes tamaños.

$$\Delta hf = \frac{1.067 \bar{v}_s^2}{gc \phi_s \epsilon^4} \cdot \frac{C_D \Delta L}{\bar{D}_p}$$

$\Delta hf$  = pérdidas de carga debidas a la fricción a través de una capa de espesor  $\Delta L$ .

$$hf = \sum_{i=1}^i \Delta hf, i = \frac{1.067 \bar{v}_s^2}{gc \phi_s \epsilon^4} \sum C_{D, i} \frac{\Delta L_i}{D_{p, i}}$$

hf = pérdidas totales de carga a través del lecho.

i = número de capas en el lecho estratificado.

$C_{D, i}$  = coeficiente de draga para  $D_{p, i}$

Como:

$$\Delta L_i = X_i L$$

$X_i$  = fracción peso de las partículas en la i-ésima capa.

$$hf = \frac{1.067 \bar{v}_s^2 L}{gc \phi_s \epsilon^4} \sum_{i=1}^i C_{D, i} (X_i / D_{p, i})$$

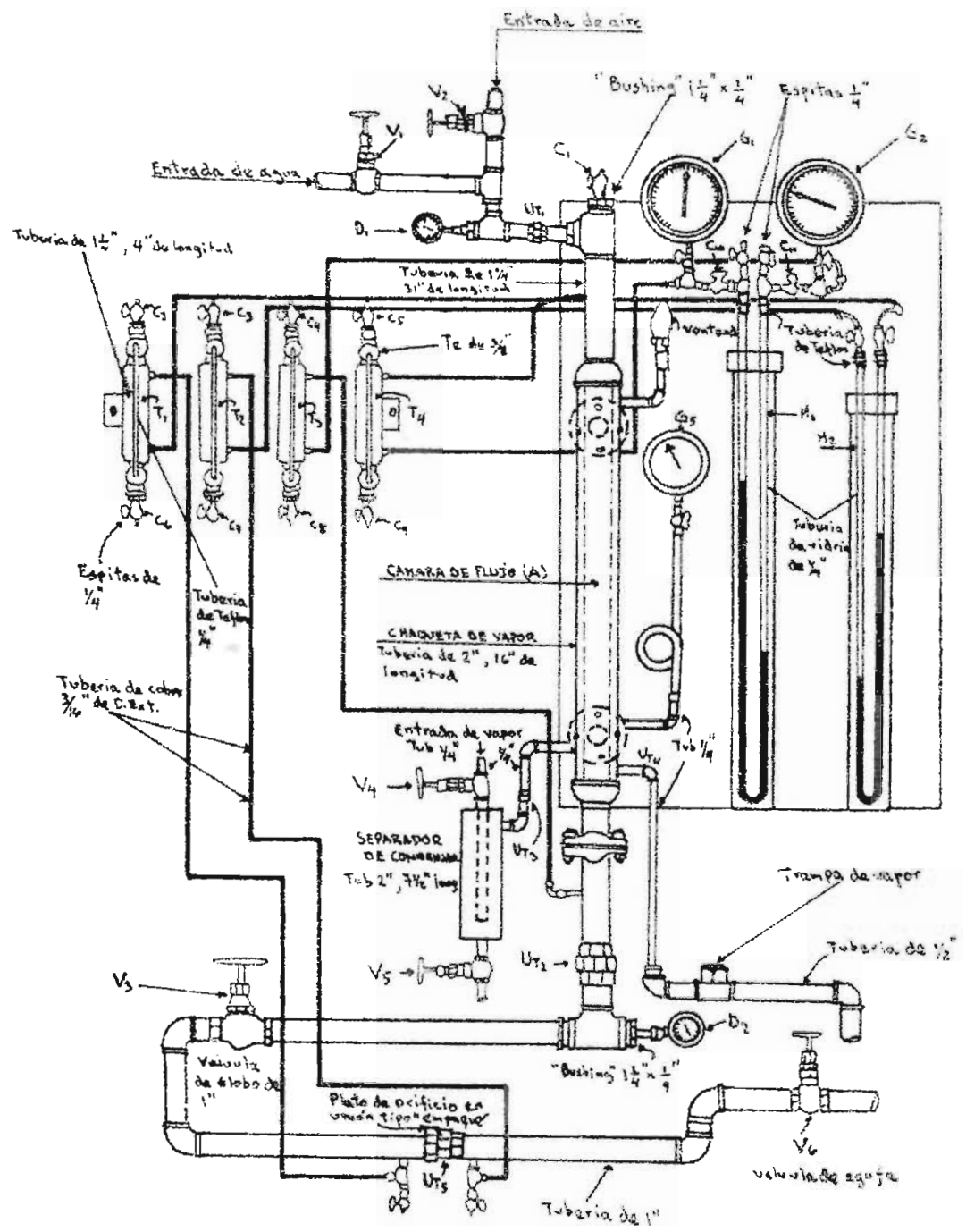
Esto se encuentra por un análisis típico de tramizado.

Nº Malla U.S Tyler.	Peso % de fracción retenida x 10 <sup>2</sup>	$\bar{D}_p$ geométrico x 10 <sup>4</sup> pie	$N_{Re}$	$C_D (X/D_p)$
14 - 20				$\sum C_D \frac{X}{D_p}$

$$(\bar{D}_p)_{geom.} = (D_{p1} \times D_{p2})^{\frac{1}{2}}$$

...

# APARATO PARA EL ESTUDIO DEL FLUJO DE FLUIDOS A TRAVES DE SOLIDOS & GRANULADOS



C = espigas                      G = medidores de presión                      T = trampas de los manómetros  
 D = Termometro de cuadrante    M = manometro                      V = valvula



## SECCION 7.

### CONSTRUCCION DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

#### 7.1 Construcción de los manómetros.

Entre una de las partes principales del aparato están los medidores de presión relativa y los manómetros Hg - H<sub>2</sub>O, siendo su función registrar las caídas de presión a través del lecho de sólidos y del medidor de orificio.

Los dos manómetros Hg - H<sub>2</sub>O, tienen 1/4 x 25 pulgadas teniendo forma de U.

Los dos medidores de presión (gauge) desde 0 hasta 100 lb/pulg<sup>2</sup>.

El uso de manómetros ya sea para H<sub>2</sub>O como para aire da lugar a errores.

- 1) Cuando se usa el sistema con H<sub>2</sub>O, es difícil dejar las líneas manométricas libres de aire.
- 2) Cuando se opera con aire es difícil desplazar el aire con H<sub>2</sub>O.

Para vencer las dificultades citadas están las trampas (T<sub>1</sub> a T<sub>4</sub>), sirviendo para dejar las líneas manométricas (tanto del lecho como del diafragma) libres de aire. Cuando se opera el sistema con H<sub>2</sub>O, en caso de no quedar libres de aire, suceden variaciones de presión ficticias.

Entre las ramas de los manómetros se instalaron válvulas para evitar la fuga de Hg cuando hay caídas de presión grandes, las cuales es mejor observarlas en los medidores de presión "gauge".

Las líneas manométricas usadas son de 3/16 pulgadas D. Ext. tubería de cobre, tanto las que llegan a las trampas como a las tomas de presión.

En el caso que se tenga un descuido en la operación y la presión sea demasiado grande para que la soporte la columna de mercurio, no habrá pérdida del mercurio pues las trampas Agua-Aire sirven también como trampas de mercurio.

Ya sea que el sistema se opere con aire o con  $H_2O$ , los manómetros siempre tendrán  $H_2O$  sobre mercurio.

Los manómetros en forma de U se unen a las líneas manométricas mediante espitas de  $\frac{1}{4}$  de pulgada.

Entre la espita y el tubo de vidrio, la unión fue hecha por medio de tubos de Teflón, reforzado con abrazaderas de alambre, eliminándose así, las fugas y permitiendo facilidad de desmontaje.

El manómetro en forma de U (para el orificio es del tipo Hg -  $H_2O$ ), tiene 25 pulgadas de longitud, pero al operarlo resulta insuficiente para caídas mayores que 48 mm, siendo necesario aumentar su longitud.

La purga de aire en este manómetro se hace por medio de las espitas de desagüe en el diafragma, siendo fácil su desalojo; por ejemplo si hay aire en la rama izquierda del manómetro, se cierra la espita izquierda teniendo cuidado que no se escape el mercurio, se aumenta la presión hasta que la gota de aire escape (en este caso las espitas de desagüe del diafragma deben estar cerradas; después que la gota de aire escape, se cierran las dos espitas del manómetro y se abren las del diafragma).

#### 7.2 Construcción de la cámara de flujo.

Es una cámara vertical hecha de tubería de  $1\frac{1}{4}$  pulgada, en la cual hay un lecho de sólidos hasta de 20 pulgadas, el cual está soportado en un fondo falso perforado.

Externamente hay una chaqueta de vapor hecha de tubería de 2 pulgadas, por donde circula el vapor cuando se desea calentar el fluido.

La presión alcanzada dadas las condiciones de operación de la caldera del Laboratorio de Operaciones Unitarias es de  $30\text{ lb/pulg}^2$  (leída en  $G_5$ ), para un flujo máximo (caídas de presión 48 mm, en el diafragma) se alcanza una temperatura de  $150^\circ\text{F}$ .

### 7.3 Abertura Piezométrica en el lecho.

La abertura superior va a la trampa  $T_4$  y de la trampa a la rama izquierda del manómetro  $M_1$ , (esta abertura está a  $1\frac{1}{2}$  pulgadas del reductor tipo campana).

La abertura inferior va a la trampa  $T_3$  y de la trampa a la rama derecha del manómetro  $M_1$  (estando a 4 pulgadas del reductor inferior tipo campana).

### 7.4 Desmote de la cámara de flujo.

Se usan 3 llaves Stillson, 2 llaves N° 24, 1 llave N° 12.

El desmote del aparato es conveniente hacerlo entre dos personas, teniendo cuidado de no quebrar los manómetros por medio de un golpe con la llave o por movimientos bruscos del soporte del aparato, dado que el material de que están hechos es vidrio.

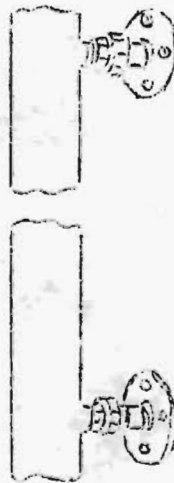


Fig. N° 7

En la parte posterior, la cámara de flujo está unida al soporte del aparato por medio de 2 uniones "Flange" de  $\frac{1}{2}$  pulgada y uniones a tuerca de  $\frac{1}{2}$  pulgada, el niple de  $\frac{1}{2}$  pulgada está soldado fuera de la chaqueta de vapor.

Una vez se han terminado las corridas para arena de un determinado número de malla, y se quiere usar otro número de malla, es necesario desmontar la cámara como se indica a continuación.

La unión a tuerca  $UT_1$  con un movimiento hacia arriba.

$UT_2$  ,  $UT_3$  con un movimiento hacia la izquierda.

Las 2 uniones a tuercas, posteriores y  $UT_4$  con un movimiento hacia la derecha.

Las uniones a tuercas que estén en contacto con el fluido, se deben apretar bien para evitar fugas agregando pasta selladora (por ejemplo, permatex N°2).

#### 7.5 El Soporte para los Sólidos.

Consiste de un plato de lámina N° 24, perforado con agujeros de  $\frac{1}{4}$  de pulgada, sostenido entre empaques de hule (entre brida con pestaña de  $1\frac{1}{4}$  -- pulgada). Se pone un disco de tela de alambre de 20 mallas, descansando sobre el plato perforado, si se quiere usar sólidos de diámetros menores que la malla 20, tendrá que buscarse una adecuada para retener los sólidos.

Es conveniente que sea de acero inoxidable pero debido a las limitaciones de adquisición se tuvo que usar estañada.

#### 7.6 Construcción del medidor de orificio.

Es de tubería de una pulgada y una unión a tuerca, cuyo desmonte es hacia abajo.

El plato de orificio está sostenido entre un empaque de hule, el diámetro externo del plato es de  $1\frac{1}{2}$  pulgada y el material usado latón.

El diámetro interno del orificio usado es de  $1/8$  pulgada.

Para determinar el tamaño del orificio en el plato consultar referencia (9) página 13.

### 7.7 Construcción de las Trampas Aire-Agua.

Se construyó con tubería de  $1\frac{1}{4}$  pulgada, porque este diámetro es mayor que el diámetro de los tubos del manómetro, y cualquier cambio en los niveles - del  $H_2O$  durante la operación es insignificante.

La longitud de las trampas es de 4 pulgadas, se tornearon los extremos, a - los cuales se les soldó un disco de lámina 24 y después se taladraron con - un agujero de  $\frac{3}{8}$  de pulgada, al cual se le adaptó una T de  $\frac{3}{8}$ ".

En el extremo superior de la T de  $\frac{3}{8}$ " superior, se le soldó una espita de  $\frac{1}{4}$ " la cual servirá para la purga de aire. En la T de  $\frac{3}{8}$ " inferior se hizo lo mismo, la espita servirá para la purga de agua.

En la parte anterior de la T se puso un niple con "cap", a este se le hizo un agujero, adaptándole un pedazo de tubería de cobre, luego los extremos - se unieron con tubería de teflón, asegurándolos con abrazaderas de alambre. Esta tubería de teflón sirve como indicador de nivel. Luego las 4 trampas - se unieron al soporte general del aparato por medio de una varilla soldada a las trampas, llevando agujero para pernos y así colocar en el soporte ge- neral, siendo de fácil montaje. Cada trampa lleva dos agujeros, al de la - parte superior llega el agua, y del inferior parte el agua a los manómetros.

## SECCION 8.

### PARTE EXPERIMENTAL

Determinar caída de presión a través del lecho de sólidos.

#### 8.1 PROCEDIMIENTO:

- 1° Se procede a clasificar la arena en mallas tipo Tyler de la N° 4 a la 16.
- 2° Se lava bien cada fracción, después se seca.
- 3° Se determina el % vacíos.
- 4° Graficar % vacíos vrs diámetro del recipiente.
- 5° Medir la caída de presión a través de las fracciones, a diferentes velocidades, variando la temperatura.
- 6° Basar los cálculos en el diámetro promedio de la partícula y la velocidad a través de los poros.
- 7° Calibrar el medidor de orificio a varias velocidades con diferentes fracciones y diferentes temperaturas.

#### 8.2 Operación con Agua.

Remover el "Bushing" B, de la cámara de sólidos, llenar con los sólidos previamente clasificados hasta la altura deseada.

Purgar el aire de la cámara de flujo A y las líneas manométricas, abriendo las espitas  $C_1 - C_5$ . También abrir las espitas del manómetro  $M_1$  y las del diafragma, cerrando las espitas después de unos minutos.

La presión del sistema y la velocidad del flujo son reguladas por medio de las válvulas  $V_1$  y  $V_6$  (estando completamente abierta la válvula  $V_3$ ).

Para calentar el fluido y ver si hay variaciones de presión con la temperatura, se introduce vapor por medio de  $V_4$ .

En cada prueba con diferentes regulaciones de caudal hechas por la válvula  $V_6$ , tomar lecturas sobre un rango completo de velocidades de flujo.

El flujo máximo que es prácticamente alcanzado es para una regulación de la válvula, que da una caída de presión de 48 mm, en el manómetro  $M_2$  debido a su altura.

En cada corrida efectuada tomar lectura en  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $M_1$ , y  $M_2$ ,  $G_1$ ,  $G_2$ . Al final quitar el "Bushing" B y tomar la altura de los sólidos debido a que los sólidos se asientan con las caídas de presión.

### 8.3 Cálculos para densidades.

Es muy difícil encontrar datos para densidades a las temperaturas escogidas, pero puede interpolarse conociendo densidades cercanas a la temperatura escogida.

Encontrar densidad del agua a  $78.5^\circ\text{F}$ , utilizando los datos siguientes:

Densidad del agua a  $70^\circ\text{F} = 62.30 \text{ lbm/pie}^3$ .

Densidad del agua a  $80^\circ\text{F} = 62.22 \text{ lbm/pie}^3$ .

#### PROCEDIMIENTO:

Diferencia entre temperaturas =  $80^\circ\text{F} - 70^\circ\text{F} = 10^\circ\text{F}$

Diferencia entre densidades. =  $62.30 - 62.22 = 9.008$

Diferencia entre =  $78.5^\circ\text{F}$  y  $70^\circ\text{F} = 8.5^\circ\text{F}$

$$X = \frac{8.5 \times 0.08}{10} = .0680$$

Densidad a  $78.5^\circ\text{F} = 62.30 - 0.0680 = 62.232$

1) Datos de la Tabla \_\_\_\_\_

Base corrida # 6

Tiempo = 17.5 seg.

Caída de presión en el orificio = 46.8 mm de mercurio

Volumen colectado =  $0.0354 \text{ pies}^3$

a) Cálculo del flujo volumétrico.

$$Q = \frac{\text{Volumen}}{\text{tiempo}} = \frac{0.0354 \text{ pies}^3}{17.5 \text{ seg.}} = 2.03 \times 10^{-3} \text{ pie}^3/\text{seg.}$$

b) Cálculo de la velocidad, pie/seg.

$$V = \frac{Q}{(A) (e/100)} = \frac{\text{Flujo Volumétrico}}{\text{Area Seccional de la cámara de flujo} \times \% \text{ Vaciós aparentes (de la Fig. N.º)}}$$

$$V = \frac{2.03 \times 10^{-3}}{0.01038 \text{ pies}^2 \times 50.2/100} = 0.390 \text{ pies/seg.}$$

( El área seccional del tubo de  $1 \frac{1}{4}$  " =  $1.495 \text{ pulg}^2 = 0.01038 \text{ pies}^2$  )

c) Cálculo del número de Reynolds.

$$N_{Rc} = \frac{\bar{D}_p \bar{V} \rho}{\mu}$$

$$\bar{D}_p = \text{Diámetro de la partícula} = 0.01330 \text{ pies}$$

$$\rho = 62.165 \text{ lbm/pie}^3 \text{ a } 85^\circ\text{F} \text{ (temperatura promedio de operación)}$$

$$\mu = 0.82 \text{ C}_p \text{ (centipoises) } \text{ ó } 0.82 \times 6.72 \times 10^{-4} \text{ lbm/pie-seg.}$$

$$\mu = 5.5 \times 10^{-4} \text{ lbm/pie-seg.}$$

$$N_{Re} = \frac{0.01330 \text{ pies} \times 0.390 \text{ pie/seg} \times 62.165 \text{ lbm/pie}^3}{5.5 \times 10^{-4} \text{ lbm/pie-seg.}}$$

$$N_{Rc} = 588.45 \text{ adimensional.}$$



## 8.4 Cálculo de los Factores de Fricción Utilizando los datos Experimentales.

De la ecuación de Bernoulli tenemos que (9):

$$f = \frac{\Delta P \bar{D}_p gc}{2 L \sqrt{V^2}}$$

$$f = \frac{\bar{D}_p gc}{2 L \sqrt{V^2}} \frac{\Delta P}{\sqrt{V^2}}$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_1 \text{ en mm x } \frac{(\text{gravedad específica del Hg})}{304.8} - \frac{\text{gravedad específica del H}_2\text{O}}{\phantom{304.8}} \times \rho$$

$$\Delta P_1 [ = ] \text{ lb/pie}^2, \quad \text{caída de presión en el lecho}$$

$$\bar{D}_p [ = ] \text{ pie}, \quad \text{diámetro de la partícula}$$

$$gc [ = ] \frac{\text{lbm} - \text{pie}}{\text{lb} - \text{seg}^2}, \quad \text{factor de Newton}$$

$$L [ = ] \text{ pie}, \quad \text{espesor de la arena}$$

$$f [ = ] \text{ adimensional}, \quad \text{factor de fricción modificado}$$

$$V [ = ] \text{ pie/seg}, \quad \text{velocidad a través de los poros.}$$

$$\rho [ = ] \text{ lbm/pie}^3, \quad \text{densidad del fluido.}$$

E J E M P L O:

Para fracción - 4 + 6 mallas

$$\bar{D}_p = 0.01330 \text{ pie}$$

$$gc = 32.2 \frac{\text{lbm} - \text{pie}}{\text{lb} - \text{seg}^2}$$

$$\bar{D}_p gc = 42.826 \times 10^{-2}$$

$$L = 36 \text{ cm x } \frac{1 \text{ pie}}{30.48 \text{ cm}} = 1.18 \text{ pies}$$

$$2L \rho = 2.36 \rho$$

Sabiendo que  $f = \frac{\bar{D}_p gc}{2 L \rho} \frac{P}{\bar{V}^2}$

Para Temperatura

Promedio = 85°F

$$\rho = 62.165 \text{ lbm/ptic}^3$$

$$2 L \rho = 146.70$$

$$f = \frac{42.826}{1.467} \times 10^{-4} (\Delta P / \bar{V}^2) = 29.1 \times 10^{-4} (\Delta P / \bar{V}^2)$$

Para un tiempo de 17.5 seg.

$$\Delta P_1 = 5.911 \text{ lb/ptic}^2$$

$$\bar{V} = 0.390 \text{ ptic/seg}$$

$$\bar{V}^2 = 15.21 \times 10^{-2} \text{ ptic}^2/\text{seg}^2$$

$$(\Delta P_1 / \bar{V}^2) = 0.388 \times 10^2$$

$$f = 29.1 \times 10^{-4} \times 0.388 \times 10^2 = 0.1129$$

Temperatura °F	Viscosidad Centipoises /	Viscosidad x 10 <sup>-5</sup> lb/pie-seg.	Densidades lb ic <sup>3</sup> Ⓢ
115.0	0.61	41 x10 <sup>-5</sup>	61.783
113.5	0.61	41 x10 <sup>-5</sup>	61.85
105.0	0.67	45 x10 <sup>-5</sup>	61.93
103.5	0.67	45 x10 <sup>-5</sup>	61.95
95	0.75	50.4x10 <sup>-5</sup>	62.055
93.5	0.76	51 x10 <sup>-5</sup>	62.0715
90	0.80	53.6x10 <sup>-5</sup>	62.11
85.5	0.82	55 x10 <sup>-5</sup>	62.165
81	0.85	57.1x10 <sup>-5</sup>	62.187
80.0	0.89	59.8x10 <sup>-5</sup>	62.22
78.5	0.90	60.5x10 <sup>-5</sup>	62.232
74.0	0.94	63.1x10 <sup>-5</sup>	62.268

## SECCION 9.

### 9.1 CONCLUSIONES GENERALES Y ANALISIS DE RESULTADOS.

De acuerdo al aumento con la temperatura y el Número de Reynolds, de  $\Delta P_1$  en el lecho de arena y  $\Delta P_2$  en el orificio se concluye que el diseño del aparato es aproximadamente correcto habiéndose obtenido resultados razonables, debido a la tendencia de las curvas de los distintos ensayos.

En las tablas de resultados experimentales N° 12-28 se observan algunas fallas en los resultados de las caídas de presión y factores de fricción modificadas posiblemente debidas a las fluctuaciones en algunas de las variables de operación. Hay que hacer notar que para este experimento se necesita que el agua de alimentación venga con presión constante, cosa que es prácticamente imposible de alcanzar actualmente en la Ciudad Universitaria.

Para las gráficas de calibración del medidor de orificio como para la gráfica del factor de fricción modificado ( $f_{\text{modificado}}$ ) Vrs Número de Reynolds modificado ( $Re_{\text{modificado}}$ ) se eliminaron los valores que denotaban una variación de presión considerable respecto al resto donde si fue posible trazar una curva representativa.

### 9.2 OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.

En el laboratorio de Operaciones Unitarias se ha colocado un silo horizontalmente a raz de suelo siendo inadecuado este sistema de arreglo para la distribución de agua.

Se le ha adaptado una bomba de 1/3 Hp con capacidad de 15 gal/minuto variando la presión desde 0 hasta 60 lb/pulg<sup>2</sup>.

Lo conveniente en este caso es poner reciclo de la bomba al silo, pudiendo alcanzar presiones progresivamente constantes (hasta 50  $\frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2}$ ).

...

Es conveniente en estas condiciones efectuar el experimento cuando no esté abierta ninguna válvula en el laboratorio, pues esto puede dar lugar a variaciones de presión, obteniéndose lecturas equivocadas. Otra dificultad es con la purga del aire no sólo el contenido en el aparato, sino el arrastrado por las tuberías de agua del laboratorio.

Para eliminar este inconveniente se abren las espitas de la  $C_1$  a la  $C_5$  teniendo especial cuidado de cerrar las de los dos manómetros, luego se deja circular agua por el sistema durante unos 30 segundos.

Hay que controlar la presión puesta en la bomba (trabajando en reciclo) cada 15 minutos pues hay variaciones en este lapso, dando lugar a errores en las lecturas.

El aparato deben hacerlo funcionar por lo menos, dos personas para obtener buenas lecturas.

En el caso particular fue operado por una sola persona.

En vista que se observan desviaciones en los resultados experimentales es recomendable utilizar métodos de operación más exactos por ejemplo el sistema de control de flujo para la calibración, tipo de manómetros de mercurio, precisión en las lecturas. Ya que no se efectuó un análisis estadístico de los datos, queda abierta la posibilidad de hacer un análisis de regresión, para los interesados en utilizar dichos datos para aplicación práctica posterior.

10.1

N O M E N C L A T U R A

A	Area seccional de la cámara de flujo, pies <sup>2</sup>
Ab	Abertura o tamaño del tamiz, pulgadas
a	Porcentaje de gruesos en la alimentación
b	Porcentaje de finos en la alimentación
c	porcentaje de gruesos en el sobretamaño
C <sub>D</sub>	Coefficiente de draga, adimensional.
D	Diámetro de la tubería, pies
$\bar{D}_p$ ó D <sub>p</sub>	Diámetro promedio de la partícula, pies
$\bar{D}_p^2$	Cuadrado del promedio aritmético entre dos aberturas, pies <sup>2</sup>
$\bar{D}_p^3$	Cube del promedio aritmético entre dos aberturas, pie <sup>3</sup>
D <sub>P<sub>L</sub></sub>	Diámetro promedio basado en la longitud, pies
D <sub>P<sub>m</sub></sub>	Diámetro promedio basado en la masa, pies
D <sub>P<sub>v</sub></sub>	Diámetro promedio basado en la superficie por unidad de volumen. Pies.
d	diámetro del grano efectivo o equivalente, pies.
E	porcentaje de finos recuperados en el tamizado
E <sub>T</sub>	Rendimiento o eficiencia del tamiz.
e	Relación de vacíos, adimensional
f <sup>1</sup> , f <sup>11</sup>	Factores de fricción, adimensionales
f	Factor de fricción en la ecuación de Fanning, adimensional.
gc	Factor de conversión de Newton, (pie)(lbm)/(lbf) (seg <sup>2</sup> )
hf	Pérdidas friccionales de carga, (pie)(lbf)/(lbm)
i	Número de fracciones peso en una mezcla y número de capas en un lecho estratificado.
j	Gradiente hidráulico, adimensional.
K	Coefficiente de permeabilidad, pie/seg.
L	Longitud del lecho de sólidos, pies

m	Masa del fluido pasando a través de secciones en la ecuación de continuidad,
M	Número de malla
N	Número de partículas en el lecho de sólidos.
n	porosidad.
$N_{Re}$	Número de Reynolds modificado, adimensional
O	Porcentaje del subtamaño en el subretamaño
P	Carga hidrostática, lbf/pie <sup>2</sup>
$P_{abs}$	Presión absoluta, lbf/pie <sup>2</sup>
$P_o$	Presión atmosférica, lbf/pie <sup>2</sup>
$\Delta P_1$	Caída de presión friccional a través del lecho poroso, lbf/pie <sup>2</sup>
$\Delta P'_1$	Caída de presión, mm (Agua sobre mercurio)
$P/\gamma$	Carga de presión, pies
Q	Flujo volumétrico o velocidad de descarga pies <sup>3</sup> /seg
q	Flujo específico o descarga específica, pies/seg.
R	Fracción o tanto por uno de los finos recuperados en el tamizado.
$r_H$	Radio hidráulico, pies
S	Grado de saturación
$S_p$	Area de superficie de una sola partícula, pies <sup>2</sup>
T	Tiempo, seg.
U	Porcentaje del subtamaño en la alimentación
$\bar{V}$	Velocidad promedio de flujo, pies/seg.
$\bar{V}_s$	Velocidad superficial del flujo, pies/seg.
V	Velocidad a través de los vacíos, pies/seg.
$V_c$	Volumen del canal, pies <sup>3</sup>
$V_s$	Volumen de sólidos, pies <sup>3</sup>
$V_p$	Volumen de una sola partícula, pies <sup>3</sup>
w	Flujo de masa lbm/sec.
$\hat{w}$	Resistividad hidráulica sec/pie
X	Fracción masa retenida
$X_i$	Fracción peso de partículas de tamaño $D_p$ i y de las partículas en la capa i-ésima.

LETRAS GRIEGAS

$\Delta$  (Delta) Diferencia finita entre dos cantidades

$\rho$  (Rho) Densidad del fluido,  $\text{lbm}/\text{pie}^3$

$\epsilon$  (Epsilon) Porosidad del lecho, adimensional

$\mu$  (Mu) Viscosidad absoluta del fluido,  $\text{lbm}/\text{pie}\cdot\text{seg}$

$\mu(\text{lbm}/\text{pie}\cdot\text{seg}) = \text{Viscosidad en centipoise} \times 6.72 \times 10^{-4}$

$\nu$  (Nu) Viscosidad cinemática del fluido,  $\text{pie}^2/\text{seg}$

$\phi$  (Phi) Factor de forma de las partículas, adimensional

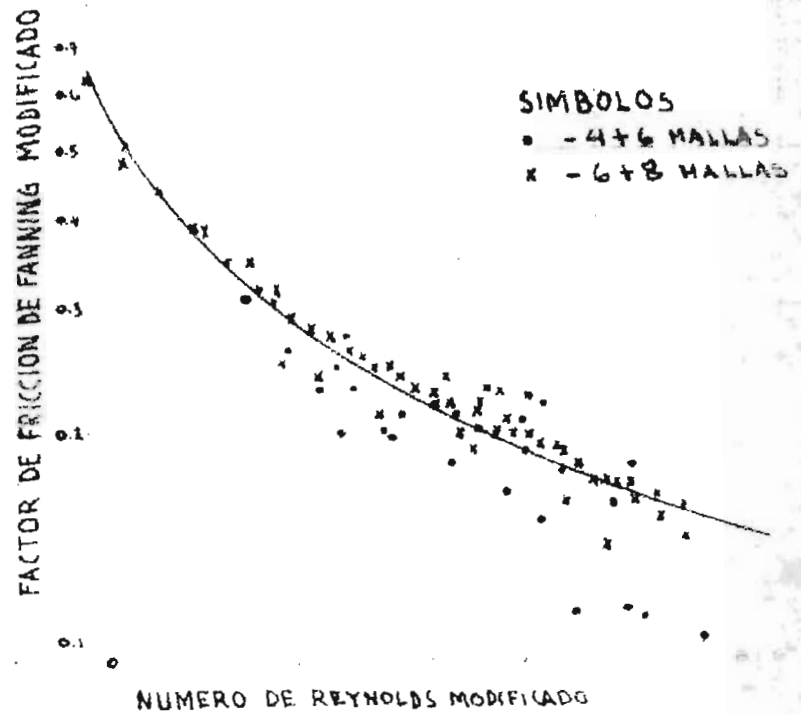
$\gamma$  (Gamma) Peso unitario de líquido  $\text{lb}/\text{pie}^3$

$\phi$  (psi) Carga piezométrica,  $\text{pie}$



1. ALBERTSON, Barton and Simons "Fluid Mechanics for Engineers" Pags. 98-100, Prentice-Hall, Inc., N.J., 1966.
2. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Vol 10 "ASTM" pags 6, 77-81,506, Baltimore USA, 1965.
3. BROWN, G. G. and Associates "Unit Operations" pags. 17-22, John Wiley and Sons, New York 1960.
4. BEAR, Zaslavsky and Irmay "Physical Principles of Water Percolation and Seepage" pags. 21-25, UNESCO, Ed., Firming-Didot, Paris, 1968.
5. DAUGHERTY and Franzini "Fluid Mechanics with Engineering Applications" Pags. 60-65, 6th Ed., Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1965.
6. FOUST, A.S., Wenzel, et.al "Principles of Unit Operations", pags 525-527, 533-55, John Wiley and Sons, New York, 1960.
7. IRANI and Clayton "Particle Size: Measurement, Interpretation, and Application" pags 25-30, 109-113, John Wiley and Sons, New York, 1963.
8. MC CABE, W.L. and Smith J.C. "Unit Operations of Chemical Engineering" pags. 94-98, 358-360, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1956.
9. MEJIA, F.J. "Diseño, Construcción y Operación de un Aparato para Medir Factores de Fricción en Diferentes Condiciones de Flujo" Tesis Doctoral, pags, 13, 24-27, 71-73, Universidad de El Salvador. San Salvador, C.A. 1968
10. PERRY, J.H. "Manual del Ingeniero Químico", Tomo 2 pags 1487, 1495-1499, UTEHA, México, 1959
11. RICH, L.G. "Unit Operations of Sanitary ENGINEERING", pags 136-145 John Wiley and Sons, New York, 1961
12. TAYLOR, D.W. "Fundamentos de la Mecánica de Suelos" pags. 121-137-145 CECSA, México, 1969.
13. ZIMMERMAN and Lavine "Chemical Engineering Laboratory Equipment" pags. 59-77, 2nd. Edition, Service Publishers Co., New York, 1955.

# FACTOR DE FRICCION MODIFICADO PARA FLUJO DE AGUA A TRAVES DE LECHOS DE ARENA



FRACCION - 6+8 MALLAS  
TEMPERATURA 115°F

Q  
Pico/Seg

0.6

0.4

0.2

0

-0.2

-0.4

-0.6

-0.8

-1.0

-1.2

-1.4

-1.6

-1.8

-2.0

2 3 4 5 6 7 8 9 10 2 3 4 5 6 7 8 9

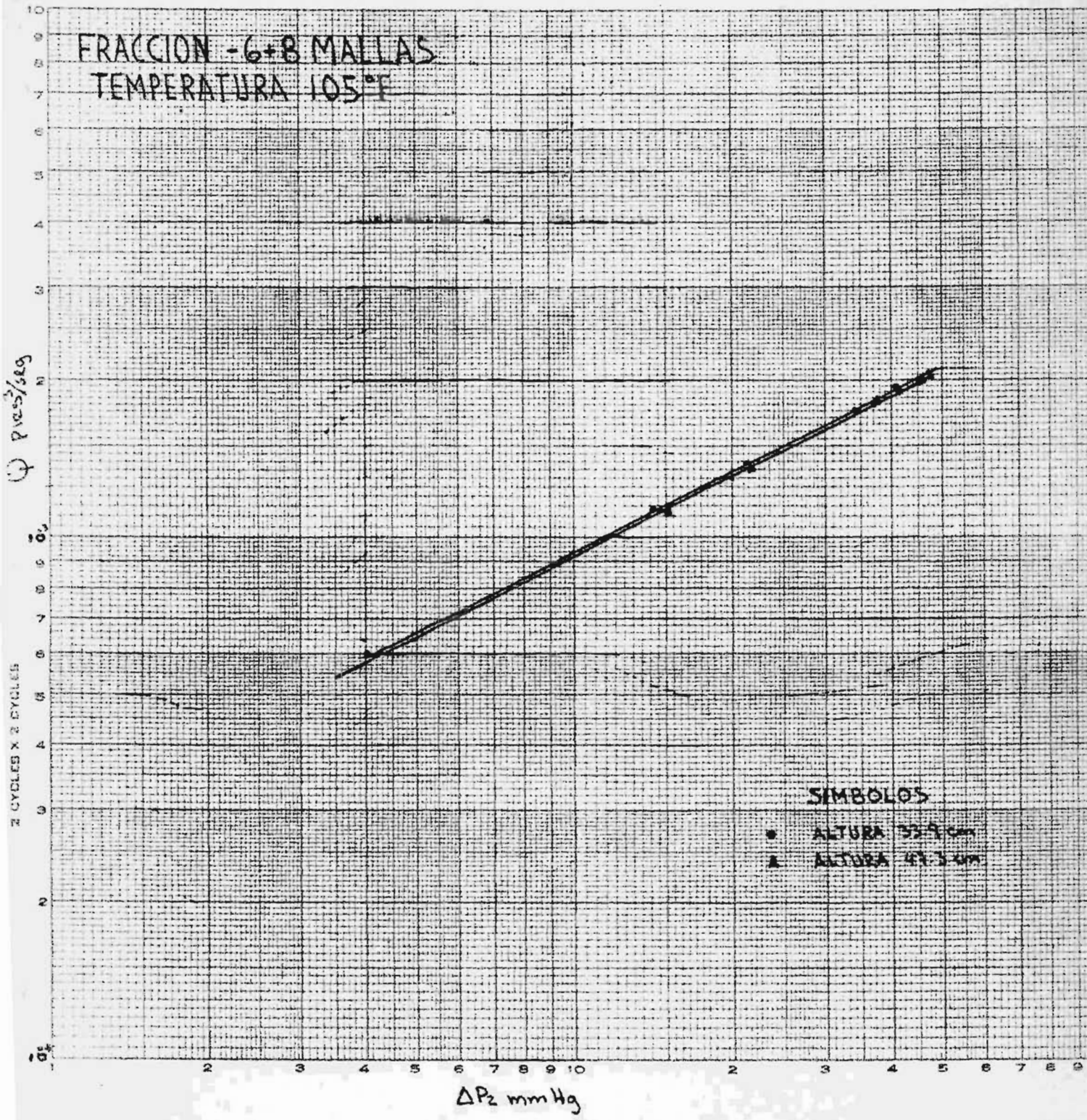
$\Delta P_2$  mm Hg

SIMBOLOS

- ALTURA 33.9 cm.
- ▲ ALTURA 47.3 cm

CURVAS DE CALIBRACION DEL MEDIDOR DE ORIFICIO

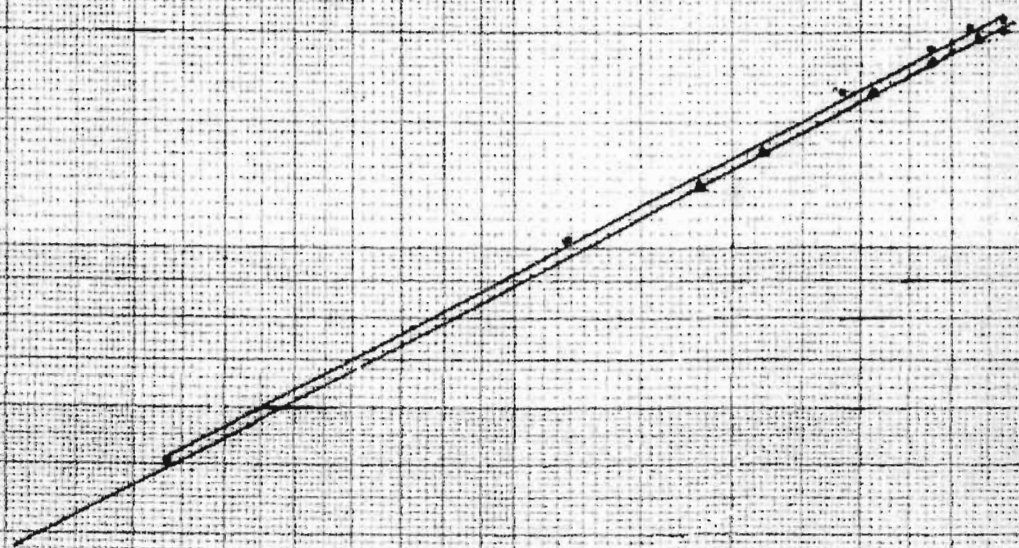
FRACCION -6+8 MALLAS  
TEMPERATURA 105°F



CURVAS DE CALIBRACION DEL MEDIDOR DE ORIFICIO

FRACCION -4+6 MALLAS

TEMPERATURA 115°F



SÍMBOLOS

● ALTURA 36 cm

▲ 50 cm

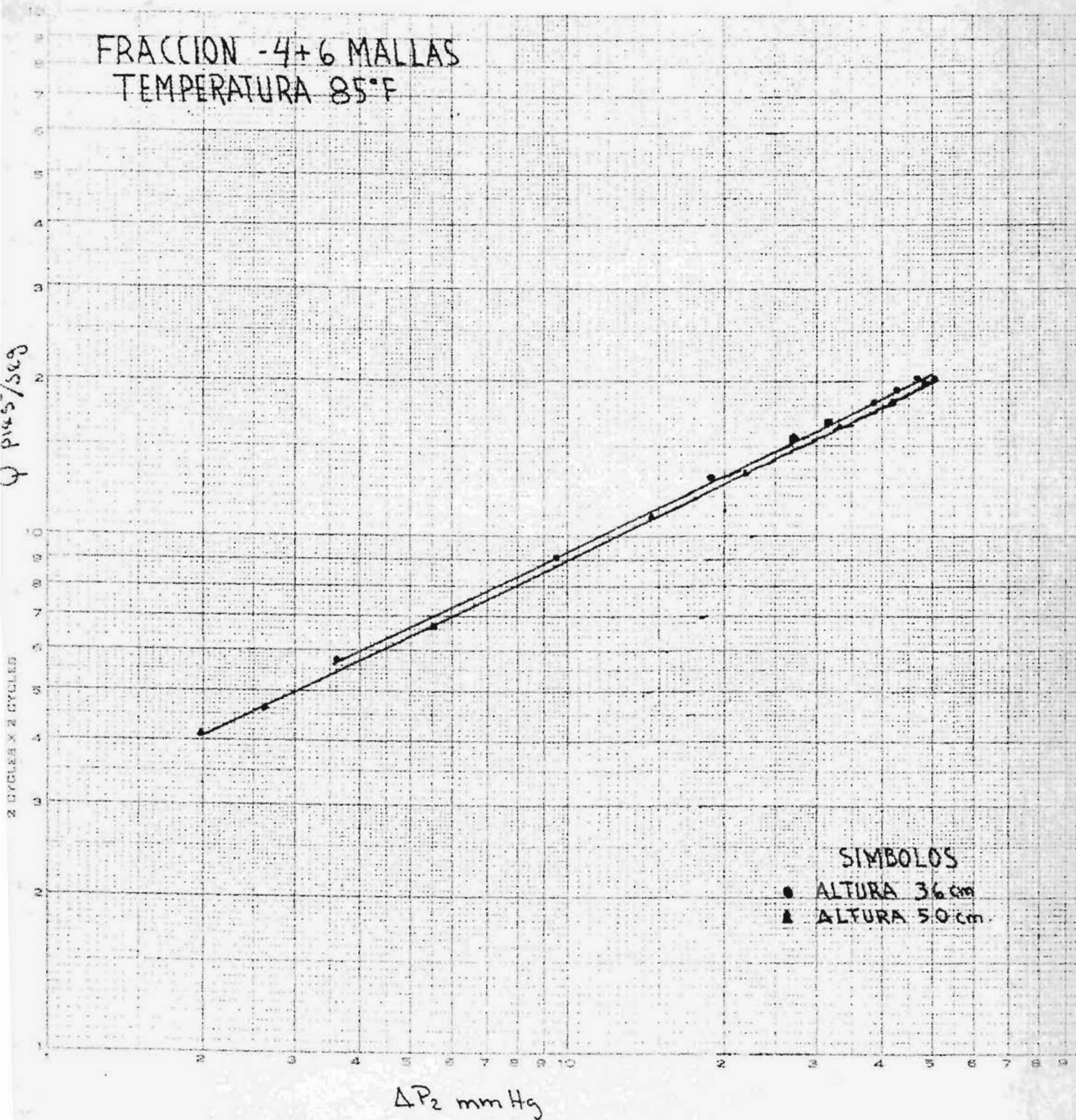
$\Delta P_2$  mm Hg

CURVAS DE CALIBRACION DEL MEDIDOR DE ORIFICIO

FRACCION -4+6 MALLAS  
TEMPERATURA 85°F

$Q$  plus/sec

2 CYCLES X 2 CYCLES



CURVAS DE CALIBRACION DEL MEDIDOR DE ORIFICIO

T A B L A N° 12

Tiempo Seg.	Lectura para el lecho $\Delta P_1$		Lectura para el Orificio $\Delta P_2$		T fondo = 74°F T tope = 74°F T promedio = 74°F	Fracción - 4 + 6 mallas Espesor de la arena = 36 cm = 25 pies	P Bomba = 22 lb/pulg <sup>2</sup>	V pie/seg	V <sup>2</sup> x 10 <sup>-4</sup>	N <sub>Re</sub> Modificado	$\Delta P_1$ lb/pie <sup>2</sup>	$(\frac{\Delta P}{V^2}) \times 10^6$	f modificado
	P <sub>izq.</sub> mmHg	P <sub>der.</sub> mmHg	P <sub>izq.</sub> mm.Hg	P <sub>der.</sub> mm.Hg									
58.5	13.4	14.0	25.3	21.9	0.6	3.4	1	0.604	1.345	152.00	1.542	1.148	0.2192
43	13.6	14.1	27.1	20.0	0.5	7.1	2	0.821	33.640	761.34	1.285	0.038	0.0072
37	13.3	14.1	28.9	18.2	0.8	10.7	3	0.955	3.348	240.45	2.056	0.613	0.1170
32	13.2	14.2	32.0	14.6	1.0	17.4	4	1.100	4.494	275.04	2.570	0.572	0.1092
26	13.1	14.3	33.1	14.0	1.2	19.1	5	1.360	6.838	342.66	3.084	0.452	0.452
21.9	12.9	14.5	37.7	9.4	1.6	28.3	6	1.620	9.703	408.18	4.112	0.421	
19.1	12.7	14.7	40.4	6.5	2.0	33.9	7	1.850	12.673	463.50	5.140	0.406	
18.6	12.7	14.7	43.8	3.2	2.0	40.6	8	1.900	13.359	474.64	5.140	0.404	
18.0	12.6	14.8	44.6	1.2	2.2	43.4	9	1.960	14.212	490.25	5.654	0.398	
17.0	12.6	14.8	46.5	0.5	2.2	46.0	10	2.080	16.00	533.76	5.654	0.53	

T A B L A N° 13.-

Tiempo Seg.	Lectura para el lecho $\Delta P_1$		Lectura para el Orificio $\Delta P_2$		$\Delta P_1$ mm.Hg	$\Delta P_2$ mm.Hg	Corri- da	$Q \times 10^{-3}$ pie <sup>3</sup> /seg	V pie/seg	$V^2 \times 10^{-2}$	$N_{Re}$ modifi- cado	$\Delta P_1$ lb/pie <sup>2</sup>	$\frac{(\Delta P_1)^2}{V^2} \times 10^4$	f modifi- ficado
	$P_{izq.}$ mm.Hg	$P_{dor.}$ mm.Hg	$P_{izq.}$ mm.Hg	$F_{der.}$ mm.Hg										
61	13.5	14.0	25.2	21.6	0.5	3.6	1	0.579	0.109	1.195	164.49	1.285	1.075	0.3128
39	13.3	14.1	28.3	18.7	6.08	9.6	2	0.905	0.174	3.03	261.87	2.056	0.679	0.1975
31.5	12.3	14.1	30.8	16.3	1.8	14.5	3	1.12	0.216	4.64	324.32	4.626	0.996	0.2898
26.5			32.8	13.9		18.9	4	1.34	0.258	6.66	388.29			
22.3	13.1	14.5	37.0	10.0	1.4	27.0	5	1.59	0.306	9.36	460.53	3.598	0.379	0.1102
21.0			39.1	7.5		31.6	6	1.68	0.323	10.43	486.12			
19.0	12.8	14.7	45.0	4.7	1.9	40.3	7	1.86	0.358	12.78	538.04	4.883	0.382	0.1111
17.5	12.5	14.8	46.8	0.0	2.3	46.8	8	2.03	0.390	15.21	588.45	5.911	0.388	0.1129

$T_{foculo} = 90$  °F      Fracción - 4 + 6 mallas       $P_{Bomba} = 20$  lb/pulg<sup>2</sup>  
 $T_{tope} = 80$  °F  
 $T_{promedio} = 85$  °F      Espesor de la arena = 36 cm = pies



T A B L A N° 14.-

Tiempo Seg.	Lectura para el lecho $\Delta P_1$		Lectura para el Orificio $\Delta P_2$		Tfondo = 110°F Ttope = 80°F Tpromedio = 95°F	Fracción - 4 +6 mallas	Espesor de la arena = 36 cm	P Bomba = 30 lbs/pulg <sup>2</sup>				
	P <sub>izq.</sub> mm Hg	P <sub>der.</sub> mm Hg	P <sub>izq.</sub> mm Hg	P <sub>der.</sub> mm Hg								
50	13.5	14.0	26.5	20.8	0.5	0.708	0.136	1.849	223.08	1.284	0.695	0.2022
34.5	13.0	14.1	29.2	17.7	1.1	1.021	0.196	3.841	321.49	1.825	0.735	0.2138
25.5	13.0	14.2	33.5	13.2	1.2	1.39	0.268	7.155	438.78	3.082	0.431	0.1254
21			37.6	8.8	28.8	1.68	0.323	4.329	529.82			
20	13.0	14.8	42.7	4.0	1.8	1.77	0.340	11.628	558.52	4.624	0.497	0.1446
17			46.6	0.9	45.7	2.08	0.400	16.000	672.52			

T A B L A N° 15

Lectura para el lecho $\Delta P_1$		Lectura para el Orificio $\Delta P_2$		Fondo		Fracción -4+6 mallas		F Bomba = 30 lb/pulg <sup>2</sup>						
				130°F		Espesor de la arena = 36 cm		pies						
				80°F										
				T promedio = 105°F										
Tiempo Seg.	P <sub>izq.</sub> mmHg	P <sub>der.</sub> mm.Hg	P <sub>izq.</sub> mm.Hg	P <sub>der.</sub> mm.Hg	$\Delta P_1$ mm.Hg	$\Delta P_2$ mm.Hg	Corri da.	$Q \times 10^{-3}$ pic <sup>3</sup> /s.	V pic/seg	$V^2 \times 10^{-2}$	$N_{Re}$ Modifi- cado	$\Delta P_1$ lb/pic <sup>2</sup>	$(\frac{\Delta P_1}{V}) \times 10^2$	f modifi- cado
34	13.0	14.6	30	17	1.6	13.0	1	1.04	0.196	3.841	358.68	4.091	1.065	0.3109
30	13.0	14.6	34.6	15.4	1.6	19.2	2	1.18	0.227	5.152	415.41	4.091	0.794	0.2318
26	13.0	14.2	33.6	13.2	1.2	20.4	3	1.36	0.262	6.864	479.46			
23.8			36.1	10.5		25.6	4	1.48	0.285	8.122	520.63			
20			40.5	6.4		34.1	5	1.77	0.340	11.628	623.11			
17.8	12.8	14.8	45.8	0.9	2.0	44.9	6	1.99	0.383	14.668	700.89	5.119	0.3495	0.1020
17.5	12.6	14.8	46.9	0.0	2.2	46.9	7	2.02	0.388	15.054	710.95			

T A B L A N° 16

Tiempo por Seg.	Lectura para el Lecho $\Delta P_1$		Lectura para el Orificio $\Delta P_2$		$T_{\text{fondo}} = 150^\circ\text{F}$ $T_{\text{tope}} = 80^\circ\text{F}$ $T_{\text{promedio}} = 115^\circ\text{F}$	$Q \times 10^{-3}$ pie <sup>3</sup> /Seg	V pie/seg.	$V^2 \times 10^{-2}$	$M_{\text{Re Modificado}}$	$\Delta P_1$ lb/pie <sup>2</sup>	$\frac{\Delta P_1}{(\frac{\Delta P_1}{V^2}) \times 10^2}$	$P_{\text{Bomba}} =$ lb/pulg <sup>2</sup>	$f_{\text{modificado}}$	
	Pizq. mm Hg	Pder. mm Hg	Pizq. mm Hg	Pder. mm Hg										$\Delta P_1$ mm.Hg
59.5	13.2	14.0	25.2	21.6	0.8	3.6	1	0.592	0.114	1.299	228.22	2.04	1.570	0.4632
34.0	13.0	14.2	29.5	17.5	1.2	12.0	2	1.04	0.200	4.000	420.42	3.06	0.765	0.2256
25	13.2	14.3	34.8	15.5	1.1	19.3	3	1.42	0.273	7.452	546.54	2.805	0.383	0.1129
21			37.5	9.5		28.0	4	1.68	0.323	10.432	646.64			
18.5			43.5	3.5		40.0	5	1.91	0.366	13.395	732.73			
17.5			44.8	2.5		42.3	6	2.02	0.388	15.093	777.77			
17			47.1	0.0		47.1	7	2.08	0.400	16.00	820.82			

T A B L A N° 17

Tiempo Seg.	Lectura para el lecho $\Delta P_1$		Lectura para el Orificio $\Delta P_2$		$T_{fondo} = 80 \text{ } ^\circ\text{F}$ $T_{tope} = 80 \text{ } ^\circ\text{F}$ $T_{promedio} = 80 \text{ } ^\circ\text{F}$	Fracción - 4 + 6 mallas Espesor de la arena = 50 cm = pies	$P_{Bomba} = 27 \text{ lb/pulg}^2$	$\Delta P_1$ mm.Hg	$\Delta P_2$ mm.Hg	Corri- da.- -	$Q \times 10^{-3}$ pie <sup>3</sup> /seg.	V pie/seg.	$V^2 \times 10^{-2}$ -	$N_{Re}$ Modifica- do.-	$\frac{\Delta P_1}{lb/pie} \times 10^2$	$\left(\frac{\Delta P_1}{V^2}\right) \times 10^2$	$f_{modifi}$ cado.-
	P <sub>izq.</sub> mm.Hg	P <sub>dor.</sub> mm.Hg	P <sub>izq.</sub> mm.Hg	P <sub>dor.</sub> mm.Hg													
87.	13.5	14.0	24.5	22.5	0.5	2.0	1	0.406	0.078	0.0609	1.68	1.285	2.105	0.4420			
53	13.2	14.2	26.0	21.0	1.0	5.0	2	0.668	0.128	1.638	177.34	2.57	1.570	0.3297			
45	13.2	14.2	26.9	20	1.0	6.9	3	0.787	0.151	2.281	209.10	2.57	1.128	0.2368			
37	13.1	14.4	28.7	18.4	1.3	10.3	4	0.955	0.183	3.370	254.28	3.341	0.991	0.2081			
34.6	13.0	14.5	29.2	17.6	1.5	11.6	5	1.02	0.196	3.841	271.46	3.855	1.003	0.2106			
28.9	12.9	14.8	35.2	14.5	1.9	20.7	6	1.22	0.235	5.522	325.47	4.883	0.884	0.1856			
25	12.6	14.9	34.9	14.9	2.3	20.0	7	1.42	0.273	7.474	378.65	5.911	0.791	0.1661			
22.5	12.6	15.2	37.7	10.2	2.6	27.5	8	1.57	0.302	9.120	418.27	6.682	0.732	0.1537			
19.7	11.4	16.5	45	5.2	5.1	39.8	9	1.80	0.346	11.971	479.21	13.107	1.091	0.2291			
17.6	11.8	16.4	47.1	0.0	4.6	47.1	10	2.01	0.233	5.428	322.70	11.822	2.18	0.4578			

Tiempo Seg.	Lectura para el lecho $\Delta P_1$		Lectura para el Orificio $\Delta P_2$		$\Delta P_1$ mm.Hg.	$\Delta P_2$ mm.Hg.	Corri- da...	$Q \times 10^{-3}$	V pie/seg	$V^2 \times 10^{-2}$	$N_{Re}$ Modifi- cado.	$\Delta P_{12}$ lb/pie <sup>2</sup>	$(\frac{\Delta P_1}{V^2}) \times 10^2$	f modifi- cado.
	P.izq. mm.Hg.	P.der. mm.Hg.	P.izq. mm.Hg.	P.der. mm.Hg.										
89.5	13.4	14.4	24.2	22.6	1.0	1.6	1	0.395	0.076	0.577	104.04	2.570	4.45	0.9362
31.5			30.4	16.5	1.5	13.9	2	1.12	0.215	4.656	295.43	3.855	0.829	0.1744
25.4	13.1	14.9	34.1	12.5	1.8	21.6	3	1.39	0.267	7.177	366.75	4.626	0.645	0.1357
20.8	12.2	15.9	39.9	7.0	3.7	32.9	4	1.70	0.327	10.692	447.66	9.509	0.890	0.1872
18.8	11.6	16.4	43.6	2.8	4.8	40.8	5	1.88	0.362	13.104	495.57	12.336	0.940	0.1977
17.3			47.0	0.0	5.0	47.0	6	2.04	0.392	15.369	536.64	12.850	0.841	0.1769

T A B L A N° 19

Lectura para el Lecho $\Delta P_1$		Lectura para el Orificio $\Delta P_2$		T <sub>fondo</sub> = 110 °F	Fracción = 4 + 6 mallas	P <sub>Bomba</sub> = 1 lb/pulg <sup>2</sup>								
Lectura para el Lecho $\Delta P_1$		Lectura para el Orificio $\Delta P_2$		T <sub>tope</sub> = 80 °F	Esesor de la arena = 50 cm = pies									
Lectura para el Lecho $\Delta P_1$		Lectura para el Orificio $\Delta P_2$		T <sub>promedio</sub> = 95 °F										
Tiempo	P <sub>izq.</sub> mm. Hg	P <sub>der.</sub> mm. Hg	P <sub>izq.</sub> mm. Hg	P <sub>der.</sub> mm. Hg	$\Delta P_1$ mm. Hg	$\Delta P_2$ mm. Hg	Corri- da.	$Q \times 10^{-3}$ pie <sup>3</sup> /seg	V pie/seg	V <sup>2</sup> x 10 <sup>-2</sup>	N <sub>Re</sub> Modific.	$\Delta P_1^2$ lb/pie <sup>2</sup>	$(\frac{\Delta P_1}{V}) \times 10^2$	f <sub>modifi- cado.</sub>
49.9	13.5	14.4	26.6	20.	0.9	6.6	1	0.708	0.136	1.849	204.82	2.312	1.26	0.2651
31.0	13.0	15	31.1	15.8	2	15.3	2	1.140	0.219	4.796	329.81	5.138	1.06	0.2230
23.3	12.5	15.5	36.5	10.5	3	26	3	1.520	0.292	8.549	440.35	7.707	0.90	0.1893
21.0	12.1	15.9	39.0	7.6	4	31.4	4	1.680	0.323	10.432	486.44	9.762	0.93	0.1956
18.0	11.7	16.5	47.0	0.0	5	47	5	1.960	0.377	14.212	567.76	12.331	0.861	0.1811

T A B L A N° 20

Tiempo Seg.	Lectura para el lecho $\Delta P_1$		Lectura para el Orificio $\Delta P_2$		$\Delta P_1$ mm.Hg	$\Delta P_2$ mm.Hg	Corri- da.	$Q \times 10^{-3}$ pie <sup>3</sup> /seg	V pie/seg	$V^2 \times 10^{-2}$	N <sub>Re</sub> Modifica- do.	$\Delta P_1$ Lb/pie <sup>2</sup>	$(\frac{\Delta P_1}{V^2}) \times 10^4$	f <sub>modi- ficado</sub>
	P <sub>izq.</sub> mm.Hg	P <sub>der.</sub> mm.Hg	P <sub>izq.</sub> mm.Hg	P <sub>der.</sub> mm.Hg										
28.8	13.8	15.1	32	14.5	1.3	17.5	1	1.24	0.238	5.678	477.07	3.315	0.588	0.1246
25.5	12.6	15.4	34.4	12.5	2.8	21.9	2	1.39	0.267	7.155	535.54	7.14	0.998	0.2115
20.8	12.5	15.7	39	8.1	3.2	30.9	3	1.7	0.327	10.692	654.65	8.16	0.761	0.1613
19.7	12.9	16	42	4.5	31	37.5	4	1.8	0.346	11.971	692.69	7.905	0.665	0.1409
17.8	11.9	16.4	45.8	2.0	4.5	43.8	5	1.99	0.383	14.668	766.76	11.475	0.781	0.1655
17.0	11.7	16.8	47.0	0.0	5.1	47	6	2.08	0.400	16.000	820.82	13.005	0.810	0.1717

$T_{fondo} = 150 \text{ } ^\circ F$   
 $T_{tope} = 80 \text{ } ^\circ F$   
 $T_{promedio} = 115 \text{ } ^\circ F$   
 Fracción - 4 + 6 mallas  
 Espesor de la arena = 50 cm = pies  
 $P_{Bomba} = \text{lb/pulg}^2$

T A B L A N° 21

Tiempo	Lectura para el lecho $\Delta P_1$		Lectura para el Orificio $\Delta P_2$		T fondo = 80 °F T tope = 77 °F T promedio = 78.5 °F	Fracción - 6 + 8 mallas Espesor de la arena = 33.9 cm = pies	P Bomba = 30 lb/pulg <sup>2</sup>	N <sub>R</sub> Modifi- cado	$\Delta P_1^2$ lb/pie <sup>2</sup>	$(\frac{\Delta P_1}{V^2}) \times 10^2$	f modifi- cado.			
	P izq. mm.Hg	P der. mm.Hg	P izq. mm.Hg	P der. mm.Hg								$\Delta P_1$ mm.Hg	$\Delta P_2$ mm.Hg	Corri- da. pic <sup>3</sup> /seg
62.4	13.3	14.5	25.0	21.9	1.2	3.1	1	0.567	0.117	1.368	112.08	3.084	2.25	0.4860
50	13.2	14.7	26.0	20.9	1.5	5.1	2	0.708	0.146	2.131	139.87	3.855	1.81	0.3909
38.1	12.9	15.0	28	18.7	2.1	9.3	3	0.930	0.192	3.686	183.93	5.397	1.46	0.3153
32.0	12.6	15.2	29.9	16.9	2.6	13.0	4	1.100	0.226	5.107	216.50	6.682	1.30	0.2808
27.5	12.3	15.0	32.3	14.4	2.7	17.9	5	1.284	0.266	7.075	254.82	6.939	0.99	0.2138
24.5	12.1	15.8	34.9	15.2	3.7	19.7	6	1.440	0.296	8.762	283.56	9.509	1.09	0.2354
22.0	11.7	16.2	37.8	8.9	4.5	28.9	7	1.608	0.332	11.022	318.05	11.565	1.04	0.2246
20.1	11.4	16.5	40.2	6.3	5.1	33.9	8	1.756	0.360	12.960	344.88	13.107	1.01	0.2181
18.0	11	17	45.4	1.0	6	44.7	9	1.960	0.404	16.321	387.03	15.429	0.95	0.2052
17.4	10.8	17.2	47.0	0.0	6.4	47.0	10	2.030	0.419	17.556	401.40	16.448	0.95	0.2052



T A B L A N° 22

Lectura para el lecho $\Delta P_1$		Lectura para el Orificio $\Delta P_2$		$T_{\text{fondo}} = 110$ °F	Fracción -6 + 8 mallas	$P_{\text{Bomba}} = \text{lb/pulg}^2$								
				$T_{\text{tope}} = 77$ °F	Esesor de la arena = 33.9 cm = pies									
				$T_{\text{promedio}} = 93.5$ °F										
Tiempo Seg.	$P_{\text{izq.}}$ mm.Hg	$P_{\text{der.}}$ mm.Hg	$P_{\text{izq.}}$ mm.Hg	$P_{\text{der.}}$ mm.Hg	$\Delta P_1$ mm.Hg	$\Delta P_2$ mm.Hg	Corri-da.	$Q \times 10^{-3}$ pie <sup>3</sup> /seg	V pie/seg	$V^2 \times 10^{-2}$	$M_{\text{Re}}$ Modifi-cado	$\Delta P_{12}$ lb/pie	$(\frac{\Delta P_1}{V^2}) \times 10^2$	$f_{\text{modifi-cado}}$
15.5	11.1	16.8	45.5	1.4	5.7	44.1	1	2.02	0.416	17.305	470.20	14.643	0.840	0.1814
20.5	11.6	16.2	40.0	6.9	4.6	33.1	2	1.73	0.357	12.744	403.52	11.817	0.933	0.2015
25.5	12.4	15.5	34.3	15.2	3.1	19.1	3	1.39	0.287	8.236	324.39	7.963	0.965	0.2084
30.1	12.7	15.2	31.1	12.7	2.5	18.4	4	1.18	0.240	5.760	272.40	6.422	1.119	0.2417
40.6	13.1	14.7	27.6	19.2	1.6	8.4	5	0.870	0.179	3.204	202.32	4.110	1.280	0.2764

T A B L A N° 23

Tiempo Seg.	Lectura para el lecho $\Delta P_1$		Lectura para el Orificio $\Delta P_2$		$T_{fondo}$ = 130 °F	Fracción - 6 + 8 mallas	$T_{tope}$ = 80 °F	Espesor de la arena = 33.9 cm =	$T_{promedio}$ = 105.0 °F	$F_{Bomba}$ picos	= lb/pulg <sup>2</sup>			
	$P_{izq}$ mm.Hg.	$P_{dor.}$ mm.Hg.	$P_{izq}$ mm.Hg.	$P_{dor.}$ mm.Hg.								$\Delta P_1$ mm.Hg.	$\Delta P_2$ mm.Hg.	Corri <sub>da.</sub>
17.0	11.4	16.5	47.0	0.0	5.1	47.0	1	2.08	0.429	18.404	549.25	13.040	0.707	0.1533
18.0	11.8	16.1	43.8	3.2	4.3	40.6	2	1.96	0.404	16.321	517.24	10.995	0.674	0.1461
20.3	11.7	16.2	40.6	6.4	4.5	34.2	3	1.74	0.359	12.888	459.63	11.506	0.894	0.1939
25.5	12.4	15.5	34.1	12.6	3.1	21.5	4	1.39	0.286	8.202	366.16	7.926	0.966	0.2095
31.0	12.7	15.0	30.5	16.3	2.3	14.2	5	1.14	0.235	5.522	300.87	5.881	1.064	0.2307
37.4	13.2	14.6	37.5	16.3	1.4	21.2	6	9.45	0.192	3.61		3.579	0.990	0.2147
55.0	13.4	14.5	25.4	21.5	1.1	3.9	7	0.642	0.132	1.742	168.99	2.812	1.615	0.3502

T A B L A N° 24.

Lectura para el lecho $\Delta P_1$		Lectura para el Orificio $\Delta P_2$		T fondo = 150 °F	Fracción - 6 + 8 mallas	$P_{Bomba} = 30 \text{ lb/pulg}^2$								
T <sub>tope</sub> = 80 °F		T <sub>promedio</sub> = 115.0°F		Espesor de la arena = 33.9 cm = pies										
Tiempo seg.	$P_{izq.}$ mm.Hg.	$P_{der.}$ mm.Hg.	$P_{izq.}$ mm.Hg.	$P_{der.}$ mm.Hg.	$\Delta P_1$ mm.Hg.	$\Delta P_2$ mm.Hg.	Corri-da.	$Q \times 10^{-3}$ pie <sup>3</sup> /seg	V pie/seg.	$V^2 \times 10^{-2}$	$N_{Re}$ Modificado.	$\frac{\Delta P_1}{\text{lb/pie}^2}$	$\left(\frac{\Delta P_1}{V^2}\right) \times 10^2$	$f_{modificado}$
32.2	12.6	15.2	29.5	17.4	2.6	12.1	1	1.06	0.219	4.796	307.69	6.648	1.387	0.3009
27.6	12.5	15.4	32.7	14.2	2.9	18.5	2	1.28	0.265	7.022	372.32	7.415	1.057	0.2293
22.4	12.4	15.5	37.6	8.9	3.1	28.7	3	1.58	0.352	10.562	456.63	7.926	0.751	0.1629
20	12.4	15.8	40.1	6.8	3.4	33.3	4	1.77	0.365	13.322	512.83	8.693	0.652	0.1414
18	11.6	16.4	45.3	1.8	4.8	43.5	5	1.96	0.404	16.321	567.62	12.273	0.750	0.1627
17	11.3	16.5	47.0	0.0	5.2	47	6	2.08	0.437	19.096	613.98	13.296	0.696	0.1510

T A B L A N° 25

Tiempo Seg.	Lectura para el lecho $\Delta F_1$		Lectura para el Orificio $\Delta F_2$		$T_{\text{fondo}} = 83$ °F	Fracción - 6 + 8 mallas	$F_{\text{Bomba}} =$ lb/pulg <sup>2</sup>	pies	$N_{R_c}$ Modific.	$V^2 \times 10^{-2}$	V pic/seg	$Q \times 10^{-3}$ pie <sup>3</sup> /seg	Corri-da.	$\Delta F_1$ mm.Hg	$\Delta F_2$ mm.Hg	V pic/seg	$\Delta P_1$ lb/pie <sup>2</sup>	$(\frac{\Delta P_1}{V}) \times 10^2$	$f_{\text{medido}}$
	$F_{\text{izq.}}$ mm.Hg	$F_{\text{der.}}$ mm.Hg	$F_{\text{izq.}}$ mm.Hg	$F_{\text{der.}}$ mm.Hg															
56	13.1	14.8	25.7	21.3					144.88	1.716	0.131	0.633	1	1.7	4.4	0.131	4.369	2.560	0.3942
42.4	12.8	15.0	27.2	19.7					190.23	2.958	0.172	0.835	2	2.2	7.5	0.172	5.654	1.910	0.2941
38.9	12.8	15.0	28.0	19.0					207.93	3.534	0.188	0.910	3	2.2	9.0	0.188	5.654	1.600	0.2464
30.8	12.1	15.7	30.8	16.0					262.12	5.616	0.237	1.15	4	3.6	14.8	0.237	9.252	1.641	0.2527
26.0	11.6	16.3	36.6	15.0					310.78	7.840	0.280	1.36	5	4.7	18.6	0.280	12.079	1.540	0.2371
24.2	11.9	16.2	34.4	15.3					332.90	9.060	0.301	1.46	6	4.3	19.1	0.301	11.051	1.223	0.1883
21.4	10.9	17.1	39.0	7.6					377.14	11.560	0.340	1.65	7	6.2	31.4	0.340	15.934	1.381	0.2126
19.5	10.5	17.4	44.7	5.0					414.75	14.062	0.375	1.82	8	6.9	39.7	0.375	17.733	1.224	0.1884
18.1	10.0	18.0	44.5	2.6					447.93	16.402	0.405	1.96	9	8.0	41.9	0.405	20.560	1.260	0.1940
17.0	9.7	18.2	47.0	0.0					474.47	18.404	0.429	2.08	10	8.5	47.0	0.429	21.845	1.180	0.1817

T A B L A N° 26

Tiempo Seg.	Lectura para el lecho $\Delta P_1$		Lectura para el Orificio $\Delta P_2$		T fondo = 110 of T tope = 80 of T promedio = 90 of		Fracción - 6 + 8 mallas Espesor de la arena = 47.3 cm =		P Bomba = pies		lb/pulg <sup>2</sup>			
	P izq. mm.Hg.	P der. mm.Hg.	P izq mmHg	P der. mm.Hg	$\Delta P_1$ mm.Hg	$\Delta P_2$ mm.Hg	Corri da.-	$W \times 10^{-3}$ pie <sup>3</sup> /seg	V pie/seg	$v^2 \times 10^{-2}$	N Re modifica do.	$\Delta P_1$ lb/pie <sup>2</sup>	$(\frac{\Delta P_1}{v^2}) \times 10^2$	f modifi cado.
17.7	8.7	16.6	46.7	0.0	7.9	46.7	1	2.00	0.413	17.056	743.40	20.295	1.190	0.1796
20.1	9.7	15.7	40.3	5.3	6.0	35.0	2	1.76	0.363	13.176	653.40	15.414	1.171	0.1768
23.8	10.3	14.5	32.5	13.3	4.2	19.2	3	1.49	0.307	9.461	553.68	10.790	1.140	0.1721
37.6	11.0	13.7	28.3	17.5	2.1	10.8	4	0.94	0.194	3.763	349.20	5.395	1.432	0.2162
56.0	11.6	13.0	25.6	20.2	1.4	5.4	5	0.633	0.130	1.690	235.80	3.596	2.124	0.3207

T A B L A N° 27.

Tiempo Seg.	Lectura para el Lecho $\Delta P_1$		Lectura para el Orificio $\Delta P_2$		T fondo		Fracción - 6 + 8 mallas		P Bomba =		$\frac{(\Delta P_1)}{v^2} \times 10^2$ modificado			
	P izq. mm Hg	P der. mm Hg	P Izq. mm Hg	P der. mm Hg	$\Delta P_1$ mm Hg	$\Delta P_2$ mmHg	Corri da.	Qx10 <sup>-3</sup> pie <sup>3</sup> /seg	V pie/seg	V <sup>2</sup> x 10 <sup>-2</sup>		N <sub>Re</sub> Modifica do.	$\Delta P_1$ lb/pie <sup>2</sup>	
														Espesor de la arena = 47.3 cm =
94.0	11.9	12.9	24.2	21.8	1.0	2.4	1	0.377	0.077	0.605	99.58	2.557	4.220	0.6389
31.0	10.8	14.0	30.4	15.3	3.2	15.1	2	1.14	0.235	5.541	300.80	8.182	1.478	0.2237
25.6	10.1	14.7	34.0	11.9	4.6	22.1	3	1.38	0.278	7.728	355.84	11.762	1.521	0.2302
19.0	9.1	15.7	41.7	4.1	6.6	37.6	4	1.86	0.383	14.707	491.52	16.876	1.146	0.1735
18.1	8.9	16.1	43.6	2.0	7.2	41.6	5	1.95	0.403	16.240	515.84	18.410	1.132	0.1713
17.5	8.5	16.4	46.0	0.0	7.9	46.0	6	2.02	0.416	17.305	532.48	20.200	1.168	0.1768

T A B L A N° 28

Tiempo Seg.	Lectura para el lecho $\Delta P_1$		Lectura para el Orificio $\Delta P_2$		T fondo = 150 °F T tope = 80 °F T promedio = 115 °F	Fracción - 6 + 8 mallas Espesor de la arena = 47.3 cm =	P Bomba = 30 lb/pulg <sup>2</sup> pies	v <sup>2</sup> x 10 <sup>-2</sup>	N <sub>R</sub> modifica-do.	V pie/seg	Q x 10 <sup>-3</sup> pie <sup>3</sup> /seg	v <sup>2</sup> x 10 <sup>-2</sup>	N <sub>R</sub> modifica-do.	$\Delta P_1$ lb/pie <sup>2</sup>	$\Delta P_1$ ( $\frac{\Delta P_1}{v^2}$ ) x 10 <sup>2</sup>	f modifi-cado.
	P izq. mm Hg	P der mm Hg	P izq. mm Hg	P der. mmHg												
17.0	10.0	17.9	47.0	0.0	7.9	47.0	1	2.08						20,145		
18.8	10.7	17.4	44.7	1.8	6.7	42.9	2	1.88						17,085		
20.0	10.9	17.0	41.0	5.7	6.1	35.3	3	1.77						15,555		
22.3	11.4	16.5	37.7	9.0	5.1	28.7	4	1.59						13,005		
27.5	12.4	15.6	34.8	14.9	3.2	19.9	5	1.28						8,160		
35.0	12.7	15.2	29.2	17.5	2.5	11.7	6	1.02						6,375		
58.5	13.5	14.5	25.4	21.6	1.0	3.8	7	0.605						2,550		