

44
24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**SENSIBILIDAD EN LA DETERMINACION
DE LA POROSIDAD EFECTIVA EN UN
EQUIPO TIPO BOYLE DE BAJA PRESION**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A :

VICTOR ENRIQUE ROMERO SILVA

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

MEXICO, D. F.

1989



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE GENERAL

	PAGINA
CAPITULO I RESUMEN	1
CAPITULO II INTRODUCCION	2
CAPITULO III CONCEPTOS GENERALES	3
III.1 MEDIO POROSO	
III.2 POROSIDAD	
III.3 TIPOS DE POROSIDAD	
- Primaria u Original	
- Secundaria o Inducida	
- Absoluta o Total	
- Efectiva	
III.4 ARREGLOS DE EMPACAMIENTOS	
III.5 TEXTURA DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS	
- Rocas Clásticas	
- Rocas No Clásticas	
III.6 FACTORES GEOLOGICOS QUE INFLUYEN EN LA POROSIDAD	
- Compactación	
- Cementación	
- Recristalización	
- Granulación	
III.7 EVALUACION DE LA POROSIDAD EN EL LABORATORIO	
- Determinación del Volumen de Roca	
- Determinación del Volumen de Poros Comunicados	
- Determinación del Volumen de Poros Comunicados y No Comunicados	
- Determinación del Volumen de Sólidos	
CAPITULO IV EQUIPO TIPO BOYLE DE BAJA PRESION	14
IV.1 DESCRIPCION DEL POROSIMETRO	
IV.2 LEY DE BOYLE Y MARIOTTE	
IV.3 PARTES CONSTITUTIVAS DEL EQUIPO	
IV.4 DEDUCCION DE LA ECUACION DEL POROSIMETRO	
CAPITULO V PROCEDIMIENTO PARA OBTENER LA POROSIDAD EFECTIVA CON EL EQUIPO TIPO BOYLE DE BAJA PRESION	22
V.1 DETERMINACION DEL VOLUMEN DE CELDA VACIA	
V.2 DETERMINACION DEL VOLUMEN DE CELDA CON MUESTRA	
V.3 DETERMINACION DEL VOLUMEN DE SOLIDOS	
V.4 DETERMINACION DEL VOLUMEN DE ROCA	
V.5 EJEMPLO PRACTICO	
V.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL METODO Y DEL EQUIPO	

CAPITULO VI	ERRORES QUE SE PUEDEN COMETER AL EFECTUAR	33
	LA MEDICION DE LA POROSIDAD EFECTIVA	
VI.1	ERRORES INHERENTES A LA MEDICION	
VI.2	ERRORES EN LA MEDICION DEL DIAMETRO Y DE LA LONGITUD	
VI.3	ERRORES EN LA MEDICION DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN	
VI.4	ERRORES EN LA MEDICION DE LA PRESION ATMOSFERICA	
VI.5	TIPOS DE ERRORES	
CAPITULO VII	PROGRAMA DE COMPUTO	39
VII.1	PROCEDIMIENTO	
VII.2	DIAGRAMA DE FLUJO	
VII.3	LISTADO DEL PROGRAMA	
VII.4	RESULTADOS DE LA CORRIDA DEL PROGRAMA	
	- A) Resultados que Arroja el Programa	
	- B) Resumen de las Porosidades Obtenidas (Tablas y Gráficas)	
	- C) Cuadros Comparativos de los Errores (Tablas y Gráficas)	
	- D) Cuadros Comparativos de los Errores comparando ambas Muestras (Tablas y Gráficas).	
	- E) Cuadro Comparativo Global de los Maximos Errores (Tabla y Gráfica)	
CAPITULO VIII	CONCLUSIONES	49
CAPITULO IX	RECOMENDACIONES	54
BIBLIOGRAFIA		

CAPITULO I

RESUMEN

Se presentan los resultados obtenidos al analizar los errores que se pueden cometer durante la medición de la porosidad de muestras de roca en un porosímetro de gas, tipo Boyle, de baja presión.

Para el estudio se consideraron dos muestras pequeñas de forma regular (cilíndrica) y se tomaron en cuenta las mediciones que se realizan directamente sobre la muestra, cuando ésta se encuentra fuera del porosímetro, así como las que se efectúan con los elementos del equipo, cuando la muestra está dentro del porosímetro.

Previo al análisis de errores se presentan conceptos generales de porosidad, se describe el fundamento teórico del equipo de laboratorio utilizado y se proporcionan detalles sobre las partes que lo integran así como del procedimiento de operación.

Para procesar la información se preparó un programa de cómputo, del cual también se incluyen detalles. Los resultados de este estudio se presentan en forma tabular y gráfica.

Con base en los resultados obtenidos se señalan las principales conclusiones y se indican algunas recomendaciones enfocadas a reducir al mínimo los errores en la medición de la porosidad y poder obtener valores correctos.

CAPITULO II

INTRODUCCION

Las rocas acumuladoras de hidrocarburos contienen aceite y/o gas junto con agua. Para la Ingeniería de Yacimientos es muy importante conocer los volúmenes de estos fluidos que existen dentro de las rocas y la facilidad con la que se mueven en el medio poroso.

A las propiedades que dependen de las características de las rocas o del sistema roca-fluidos, como las mencionadas en el párrafo anterior, se les conoce como propiedades petrofísicas.

La obtención, interpretación y aplicación de los datos petrofísicos son actividades que comprende la Ingeniería Petrolera, en especial la Ingeniería de Yacimientos. La explotación óptima de un yacimiento dependerá, fundamentalmente, de la calidad de los estudios de evaluación y predicción del comportamiento de los yacimientos, los cuales, a su vez, dependerán de la cantidad y calidad de la información que consideren. En vista de que los datos petrofísicos intervienen prácticamente en todos los estudios de yacimientos se deduce que deben determinarse lo más correctamente posible.

Las propiedades petrofísicas pueden evaluarse en forma directa, a través de análisis de muestras de roca en un laboratorio, o en forma indirecta, por medio de la interpretación de registros geofísicos y de pruebas de variación de presión en pozos.

Una de las propiedades petrofísicas más importantes es la porosidad, la cual indica la capacidad de almacenamiento de una roca. La medición de la porosidad en el laboratorio ha originado el diseño de una gran variedad de porosímetros, cada uno de los cuales requiere de su propia secuencia de observación y de medición.

En el Laboratorio de Yacimientos de la Facultad de Ingeniería se dispone de un porosímetro de gas, tipo Boyle, de baja presión para muestras pequeñas. Como sucede en todo trabajo experimental, los datos que se registran pueden ser no muy exactos, ya sea por la baja precisión de los elementos medidores o por malas observaciones del operador. Con el fin de conocer la influencia que tienen los distintos datos que intervienen para determinar la porosidad con el porosímetro de baja presión, se desarrolló el trabajo que se presenta en esta tesis.

CAPITULO III

CONCEPTOS GENERALES

III.1 MEDIO POROSO

El medio poroso es una porción de espacio ocupado por materia; una parte de ésta no es sólida y se le conoce con el nombre de espacio poroso. A la parte sólida se le conoce como matriz.

Figura No.1
MEDIO POROSO



III.2 POROSIDAD

Desde el punto de vista de la Ingeniería de Yacimientos, la porosidad es una de las propiedades físicas de la roca más importantes, representa una medida del espacio disponible para el almacenamiento de fluidos (volumen de aceite o gas, o una mezcla de éstos y agua, presentes en el yacimiento).

Un volumen de roca sedimentaria (V_r) está formado por un cierto volumen de sólidos (V_s) y un volumen de poros o huecos (V_p); es decir:

$$V_r = V_s + V_p$$

Si el volumen de poros se relaciona al volumen de roca se obtiene la porosidad (ϕ).

$$\phi = V_p / V_r$$

o también:

$$\phi = V_p / (V_s + V_p)$$

La porosidad puede expresarse ya sea en fracción o en porcentaje (%).

Con otras palabras, se puede decir que la porosidad es el porcentaje del volumen total de la roca almacenadora formado por espacios o intersticios.

III.3 TIPOS DE POROSIDAD

POROSIDAD PRIMARIA U ORIGINAL

Es aquella porosidad que se genera durante la acumulación de fragmentos o cristales para formar un sedimento, por lo que se origina durante el depósito.

De otra manera, es el resultado de la acumulación de material detrítico u orgánico, en tal forma que quedan huecos o aberturas entre los granos de arena o los fragmentos de conchas, por ejemplo. Se desarrolla con el depósito de los sedimentos que componen la roca, está representada por la porosidad intergranular de areniscas y la porosidad intercrystalina y oolítica de algunas calizas.

POROSIDAD SECUNDARIA O INDUCIDA

Es aquella que se genera posterior al depósito de los sedimentos y generalmente se presenta como fisuras, fracturas o cavernas.

Dicho de otra forma, es el resultado de algún tipo de actividad geológica que se presenta después de que los sedimentos se han convertido en roca. Los tipos más comunes de porosidad secundaria son las cavidades por disolución, que pueden variar en tamaño desde la cabeza de un alfiler hasta cavernas muy grandes, y las fisuras o fracturas producidas principalmente por el agrietamiento de la roca. La porosidad secundaria es de mucha importancia en rocas carbonatadas.

La capacidad de almacenamiento de una roca es un rasgo original de dicha roca (porosidad intergranular de areniscas) o de carácter secundario, resultante de cambios químicos (porosidad por disolución en calizas) o cambios físicos (fracturamiento de cualquier tipo de roca quebradiza). Los cambios secundarios pueden simplemente aumentar la capacidad de almacenamiento de una roca, originalmente almacenadora, o pueden convertir en roca almacenadora una que originalmente no lo era.

POROSIDAD ABSOLUTA O TOTAL

No todos los poros de una roca están comunicados, en ocasiones algunos poros están aislados.

Para poder estudiar un yacimiento se hace necesario definir los conceptos de porosidad total o absoluta y porosidad efectiva, debido a que el material cementante tiende a obstruir algunos espacios y dejarlos aislados, para así eliminar parte del volumen de poros. Esto reduce o elimina la movilidad de los fluidos y si los poros tienen hidrocarburos éstos dejan de ser recuperables.

Se denomina porosidad absoluta (ϕ_a) a la relación entre el volumen total de poros (comunicados y no comunicados) y el volumen de roca.

$$\phi_a = (V_{pc} + V_{pnc}) / V_r$$

Donde:

V_{pc} : volumen de poros comunicados.
 V_{pnc} : volumen de poros no comunicados.

Esta relación incluye tanto los espacios comunicados como los no comunicados. Debido a esto se dan casos en los que el valor de la porosidad absoluta de algunas rocas sedimentarias sea mucho muy grande, pero puede no haber movilidad de fluidos dentro de ellas.

POROSIDAD EFECTIVA

Se considera como porosidad efectiva (ϕ_e) a la relación entre el volumen de poros comunicados y el volumen de roca.

$$\phi_e = V_{pc} / V_r$$

De acuerdo con lo anterior la porosidad absoluta se puede expresar como:

$$\phi_a = \phi_e + \phi_{nc}$$

Donde:

ϕ_{nc} : representa a la porosidad debida a poros no comunicados o aislados.

La porosidad efectiva es el tipo de porosidad que más interesa en la explotación de yacimientos petroleros, dado que depende del volumen poroso comunicado, o sea, del espacio del cual se pueden extraer los fluidos.

Dicho de otra manera, representa el porcentaje de espacios intercomunicados con respecto al volumen bruto de roca. Esto indica que puede haber movimiento de fluidos.

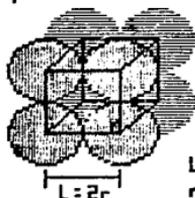
Para materiales intergranulares, regularmente bien cementados donde la configuración de poros es compleja pero están distribuidos uniformemente, la porosidad absoluta es aproximadamente igual a la porosidad efectiva.

III.4 ARREGLOS DE EMPACAMIENTOS

Algunos investigadores calcularon la porosidad de varios arreglos de empacamientos de esferas uniformes. Las celdas unitarias de dos de los empacamientos estudiados se pueden observar en la Figura No. 2:

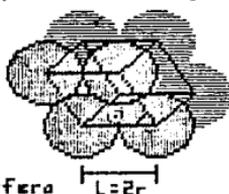
Figura No.2 Celdas Unitarias de 2 Empacimientos de Esferas Uniformes

Empacamiento Cubico



L = Lado
r = Radio de la Esfera

Empacamiento Hexagonal



OBTENCION DE LA POROSIDAD DE LOS EMPACAMIENTOS

Si se observa el empacamiento cúbico de la Figura No. 2, la celda unitaria es un cubo con lados iguales a $2r$, donde r es el radio de la esfera. El volumen de roca será el volumen del cubo:

$$V_r = V_{\text{cubo}} = L^3 = (2r)^3$$

$$V_r = 8r^3$$

De la celda unitaria se puede comprobar que el volumen de sólidos es el volumen de una esfera, por lo que:

$$V_s = V_{\text{esfera}} = \frac{4\pi r^3}{3}$$

De acuerdo con lo anterior la porosidad resulta :

$$\phi = \frac{V_r - V_s}{V_r} = \frac{8r^3 - \frac{4\pi r^3}{3}}{8r^3}$$

$$\phi = 1 - \frac{1}{6} \pi = (1 - 0.5235)$$

$$\phi = 0.4765 \quad \text{o} \quad \phi = 47.65 \%$$

De igual manera se obtienen los valores de porosidad para los empacamientos hexagonal y rómbico, que resultan ser 39.3% y 25.9%, respectivamente.

En estos desarrollos es interesante notar que el radio se cancela y la porosidad de empacamientos de esferas uniformes solamente es función del empacamiento o arreglo de los granos.

Por otra parte, se ha demostrado que las rocas están compuestas de una gran variedad de tamaños de partículas que no son necesariamente esféricas y que no solo el arreglo, sino que también la angularidad y distribución de esos tamaños de partículas afectan la porosidad.

III.5 TEXTURA DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS

Los componentes que dan a una roca sus características de textura son tres: las partículas mismas, la matriz (de material más fino que llena los intersticios entre las partículas) y el cementante (que une a las partículas con la matriz y que es un precipitado químico desarrollado posterior al depósito de los sedimentos). Entre los cementantes más comunes se tienen al sílice, la calcita, la dolomita, etc..

Figura No.3

LAMINA DELGADA DE ARENISCA



TEXTURA DE ROCAS CLASTICAS

Las rocas detríticas tienen comúnmente textura fragmentaria, que se caracteriza por la existencia de partículas rotas, desgastadas por la abrasión o irregularidades en la superficie de contacto.

En los sedimentos acarreados mecánicamente (rocas clásticas y detríticas) se cuentan cuatro propiedades de las partículas con notoria influencia sobre la textura final del depósito:

- 1.- Tamaño de los granos.
- 2.- Forma de los granos

}	a) Esfericidad
	b) Redondez
- 3.- Textura superficial.
- 4.- Orientación.

CAPITULO III

1.- *Tamaño de los granos. Es este un elemento importante, debido a su relación con las condiciones dinámicas del transporte y depósito. El método más común para medir el tamaño de partícula es el cribado, en donde al sacudir una muestra de arena disgregada dentro de un juego de cribas o tamices, las partículas se separan en diferentes grupos de acuerdo con las aberturas de cada criba.*

Otro procedimiento para determinar el tamaño de partículas pequeñas, consiste en determinar su velocidad de asentamiento (las esferas pequeñas se asientan conforme a la ley de Stokes).

2.- *Forma de los granos. Es necesario utilizar diversos conceptos geométricos. Estos conceptos son la esfericidad o redondez de la partícula y la angularidad. La esfericidad de la partícula regula, en parte, su comportamiento durante el transporte y el depósito, mientras que la angularidad refleja la distancia y el rigor de su recorrido.*

3.- *Textura superficial de los granos. La textura superficial de una partícula sedimentaria es el conjunto de los pequeños rasgos de su superficie. Estos rasgos reflejan la historia abrasiva de la partícula o pueden reflejar cambios después de la depositación (disolución posterior al depósito).*

4.- *Orientación de los granos y trama sedimentaria. La trama sedimentaria representa la orientación de las partículas en un depósito. Es importante porque controla ciertos atributos del sedimento como, por ejemplo, el espacio ocupado por los poros. Si las partículas (de diferentes tamaños) se encuentran empaçadas de acuerdo a su tamaño el espacio ocupado por los poros puede ser mucho menor que cuando están acomodadas al azar. Como se observó en los arreglos de empaçamientos.*

TEXTURA DE ROCAS NO CLASTICAS

Las rocas químicas tienen por lo general textura cristalina, caracterizada por la presencia de partículas entrelazadas, muchas de las cuales presentan caras o superficies cristalinas.

Los elementos de textura de los sedimentos no clásticos (químicos, no detriticos) llevan diferentes implicaciones procedentes de elementos clásticos.

Las texturas de las rocas no clásticas, especialmente las de los carbonatos, la caliza y la dolomía, han sido objeto de considerable estudio a causa de la necesidad de disponer de una clasificación detallada, sobre todo en relación con la explotación del subsuelo en arrecifes y otros tipos de rocas carbonatadas.

III.6 FACTORES GEOLOGICOS QUE INFLUYEN EN LA POROSIDAD

La configuración de poros proviene de la interacción de muchos factores que se originan en el medio ambiente geológico del depósito de los sedimentos. Estos factores comprenden el arreglo, la distribución del tamaño y la forma de las partículas, el tipo de material intersticial, el tipo y el grado de cementación, etc.

Mientras más suelto sea el relleno por la orientación al azar de las partículas, más grande será el espacio de poros. Los sedimentos deficientemente clasificados son menos porosos que aquellos que lo están bien.

Los fenómenos geológicos que disminuyen e incluso pueden destruir la porosidad son :

COMPACTACION

Es el efecto debido a la compresión por el peso de la roca sobreyacente. La compactación de arcillas puede alcanzar hasta el 50 %, pero en arenas la disminución en volumen es mucho menor (10 % aproximadamente). La compresión de un sedimento produce un empaquetamiento más cerrado de los granos, expulsando al mismo tiempo el exceso de fluidos.

CEMENTACION

Los granos sueltos de arena se convierten en areniscas por compactación y cementación. Si la cementación avanza hasta su último grado, la porosidad es destruida. Como regla general, la cementación disminuye el porcentaje de porosidad de las areniscas desde un valor inicial de la misma de 30 % o 40 % hasta un valor de 10 % o 20 %.

RECRISTALIZACION

La recristalización puede destruir cualquier porosidad inicial al convertir la roca original en un agregado denso de cristales entrelazados. Es un rasgo común del metamorfismo y una de las razones por las que las rocas metamórficas son característicamente impermeables.

GRANULACION

Cuando las rocas que han estado profundamente enterradas en el pasado geológico y han sido comprimidas fuertemente por fuerzas diastroficas laterales, sufren granulación en grados variables. Los efectos de la presión incluyen el aplastamiento y rotura de los granos minerales. La granulación puede disminuir la porosidad por compresión de la roca.

Como la explotación petrolera traspasa ya los 6,000 m. de profundidad, la persistencia de la porosidad con la profundidad se convierte en un tema de extrema importancia. Puede concluirse que la porosidad de las rocas almacenadoras tiende a disminuir con la profundidad de sepultamiento.

III.7 EVALUACION DE LA POROSIDAD EN EL LABORATORIO

No existe un método que permita obtener directamente la porosidad de un núcleo (tapón). Para evaluar ésta en el laboratorio se requieren medir cuando menos dos de los tres siguientes parámetros:

- A) Volumen de Roca, Vr
- B) Volumen de Poros, Vp
- C) Volumen de Sólidos, Vs

DETERMINACION DEL VOLUMEN DE ROCA

Se pueden utilizar dos métodos, de acuerdo a la homogeneidad de la muestra:

1) Muestras de geometría regular. Con sólo medir las dimensiones de la muestra y utilizando la ecuación correspondiente se obtiene el volumen de roca. Por ejemplo, si la muestra es cilíndrica:

$$V_r = \pi \frac{d^2}{4} h$$

Donde:

$$\pi = P_1 = 3.1416$$

d = Diámetro de la muestra (cm).

h = Altura o Longitud de la muestra (cm).

2) Muestras de forma irregular. Existen dos métodos para determinarlas:

2.1) Método Volumétrico. La muestra se sumerge en un líquido y se observa el volumen desplazado de fluido. Para que no exista error, la muestra debe estar revestida con parafina o saturada con el mismo líquido en el cual se introducirá. También la muestra se puede sumergir en Hg, el cual, debido a su tensión superficial alta, no penetra dentro del espacio poroso de la roca, si sólo tiene porosidad intergranular.

2.2) Método Gravimétrico. Observando la pérdida en peso de la muestra (revestida o saturada) cuando se sumerge en un fluido u observando la pérdida en peso de un picnómetro, primero lleno con Hg y, luego, con Hg y la muestra. En ambos casos se debe tomar en cuenta la densidad del fluido utilizado y la de la roca.

DETERMINACION DEL VOLUMEN DE POROS COMUNICADOS

Todos los métodos basados en la introducción de un fluido al espacio poroso o la extracción de un fluido del espacio poroso de la roca, en los que se mide el fluido para saturarla o desaturarla permiten cuantificar la porosidad efectiva. Se pueden utilizar dos tipos de fluidos:

1) Por medio de un Gas. Cuando se utiliza un gas, la medición se realiza con base en la Ley de Boyle:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = CTE$$

Considerando la masa y la temperatura constantes.

Procedimiento. Para una masa de gas que permanece constante, se realizan variaciones de volumen y de presión y se hacen las mediciones correspondientes, manteniendo la temperatura constante. El gas que se utilice no debe alterar el medio poroso.

2) Por medio de un Líquido. Cuando se utiliza un líquido para medir el volumen de poros comunicados se requiere:

- *Pesar la muestra limpia y seca (W1).*
- *Saturar completamente los poros con un líquido (agua o aceite) que no altere el medio poroso.*
- *Pesar la muestra 100 % saturada con el líquido (W2).*
- *Determinar el volumen de poros con la ecuación:*

$$V_p = \frac{W_2 - W_1}{d_l}$$

Donde:

d_l = densidad del líquido

Comparación entre ambos métodos:

- *Cuando se utiliza líquido se requiere mucho tiempo (24 hrs mínimo), en cambio con gas se requiere de muy poco tiempo.*
- *Si la saturación de líquido no se hace con cuidado no se alcanzará una saturación de 100 % y, por lo tanto, no se obtendrá el valor correcto de la porosidad.*
- *Si se utiliza agua se corre el riesgo de alterar el medio poroso cuando existe material arcilloso, sobre todo si el agua es de baja salinidad. También, en este caso, se obtendrán valores erróneos de la porosidad.*

Cuando se tienen que realizar mediciones de resistividad o se desea estimar la influencia de las arcillas sobre la porosidad, se recomienda medir el V_p tanto con gas como con agua, en este orden.

DETERMINACION DEL VOLUMEN DE POROS COMUNICADOS Y NO COMUNICADOS

Para determinar la porosidad absoluta se deben considerar todos los poros, ya sea que estén interconectados o no, y debe realizarse la extracción de fluidos o hidrocarburos que la roca contenga inicialmente. Los pasos generales para obtener la información necesaria son los siguientes:

- Seleccionar una muestra y eliminar los residuos de lodo de perforación que existan sobre la superficie.
- Determinar el volumen de roca (V_r) con cualquiera de los métodos descritos anteriormente.
- Triturar la muestra, lavar los granos con un solvente apropiado (acetona por ejemplo) para eliminar hidrocarburos y agua.
- Determinar el volumen de granos secos (V_s), con un picnómetro o medidor de volumen usando como fluido kerosena, tetracloroetano, etc.
- Calcular el volumen de poros comunicados (V_{pc}) y no comunicados (V_{pnc}) haciendo la diferencia entre volumen de roca (V_r) y volumen de sólidos (V_s), como se observa en la siguiente expresión :

$$V_{pc} \text{ y } V_{pnc} = V_r - V_s$$

Con este procedimiento no se toma en cuenta el arreglo de los granos y puede haber error en la estimación del volumen de poros (determinación del V_{pc} y V_{pnc}).

DETERMINACION DEL VOLUMEN DE SOLIDOS

Para trabajos donde no se requiere mucha exactitud, el volumen de sólidos se puede obtener dividiendo el peso de la muestra seca entre 2.65 gr/cm^3 , que es el valor promedio de la densidad de los granos de la roca.

En determinaciones más precisas, se mide el V_p y luego se tritura la muestra para obtener el V_s . Como ejemplos se pueden citar el método de Melcher Nutting(*) en el que las mediciones son gravimétricas y el de Russell(*), en el cual se utiliza un medidor de volumen especial. De aquí se determina el valor de la porosidad total.

El volumen de granos también se puede obtener por desplazamiento volumétrico con un gas o un líquido. Se conocen métodos como el del porosímetro Stevens(*) que mide el volumen de granos real para estimar el valor de la porosidad efectiva, al igual que el porosímetro de Expansión de Gas del Bureau of Mines(*).

(*) Aguilera L. Mario

"El Manejo de Datos Petrofísicos para el estudio de Yacimientos".

Tesis Profesional. Facultad de Ingeniería, UNAM. (1985).

Para saber el grado de confiabilidad en las mediciones se han realizado pruebas en las que, despues de muchos experimentos, se definio que todos los métodos comúnmente usados para determinar la porosidad efectiva proporcionan resultados con un grado de exactitud muy bueno, claro está si se desarrollan con mucho cuidado.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los diferentes métodos y equipos propuestos para determinar la porosidad.

T A B L A 1

RESUMEN DE LOS DIFERENTES METODOS Y EQUIPOS PROPUESTOS PARA DETERMINAR LA POROSIDAD, ADEMAS DEL EQUIPO TIPO BOYLE DE BAJAS PRESIONES (POROSIDAD EFECTIVA) QUE SE TRATA A DETALLE EN ESTE TRABAJO.

PARAMETRO	METODO	EQUIPO	POROSIDAD
VOLUMEN DE ROCA	GRAVIMETRICO	PICNOMETRO DE ACERO	TOTAL Y EFECTIVA
		BALANZA WESTMAN	
	VOLUMETRICO	RUSSELL	
VOLUMEN DE SOLIDOS	GRAVIMETRICO	MELCHER NUTTING	TOTAL
	VOLUMETRICO	RUSSELL	
	DESPLAZAMIENTO DE UN GAS O UN LIQUIDO	STEVENS	EFECTIVA
		BARREAU OF MINES	
VOLUMEN DE POROS	INTRODUCCION O EXTRACCION DE UN LIQUIDO	WASHBURN BUNTING	EFECTIVA
		STEVENS	
		KOBE	

CAPITULO IV

EQUIPO TIPO BOYLE DE BAJA PRESION

IV.1 DESCRIPCION DEL POROSIMETRO

El porosímetro tipo Boyle, de presión baja, es un aparato de vidrio que sirve para obtener rápidamente porosidades de materiales porosos. El método consiste en medir los volúmenes que ocupa un gas al cambiar las presiones, manteniendo constantes tanto la masa del gas como la temperatura. En este método se aplica básicamente el principio de la ley de Boyle:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

Donde:

P_1, V_1 son las condiciones iniciales del proceso.

P_2, V_2 son las condiciones finales del proceso.

Se considera:

$$V_2 = V_1 + DV$$

DV = cambio en el volumen durante el proceso
(incremento de volumen).

Los volúmenes se obtienen a presión atmosférica y a presiones bajas en una simple operación. Este aparato es fácil de construir y además consta esencialmente de cinco componentes básicos.

En resumen, el procedimiento operacional consta de dos pasos para obtener el volumen de sólidos que son: el cálculo del volumen de celda vacía y el cálculo del volumen de celda con muestra, y un tercer paso para obtener el volumen de roca. Una vez obtenidos estos dos parámetros (volumen de sólidos y volumen de roca), se obtiene la porosidad de la roca.

IV.2 LEY DE BOYLE Y MARIOTTE

Los gases se distinguen de los líquidos en que son muy compresibles, o sea que bajo la acción de variaciones de presión, a que se encuentren sometidos, su volumen cambia notablemente.

El físico irlandés Roberto Boyle (1627-1691) se interesó en esta propiedad de los gases. En 1660 descubrió la relación que hay entre la presión que soportan los gases y su volumen; debiendo advertirse que el francés Edmundo Mariotte (1620-1684) llegó a las mismas conclusiones.

Esta importante relación se conoce con el nombre de Ley de Boyle y Mariotte e indica:

"Si la temperatura no cambia, las presiones que soporta una cierta cantidad de gas son inversamente proporcionales a los volúmenes que ocupa".

Lo que se puede indicar en la siguiente ecuación:

$$P = \frac{CB}{V} \quad \text{o} \quad P V = CB$$

Donde:

P = Presión, (New/m²)
 V = Volumen, (m³)
 CB = Constante, (Joules). Esta constante depende del tipo y cantidad de gas que se utilice.

De acuerdo con lo la ecuación anterior para unas condiciones iniciales (1), queda:

$$P_1 V_1 = CB$$

para otras condiciones (2), queda:

$$P_2 V_2 = CB$$

Como se considera que en ambos casos la temperatura es la misma y también la cantidad de gas, los segundos miembros de estas dos ecuaciones son iguales, por lo que los primeros también lo serán y se puede expresar lo anterior en la siguiente forma:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

Para comprobar la validez de la Ley de Boyle y Mariotte, se puede realizar el siguiente experimento:

Conéctese un tubo de vidrio graduado, cerrado por uno de sus extremos, a un tubo de hule largo lleno de mercurio, de tal manera que dentro de él quede encerrado un poco de aire. El otro extremo del tubo de hule con mercurio se conecta a un tubo de vidrio abierto (Fig. 4a).

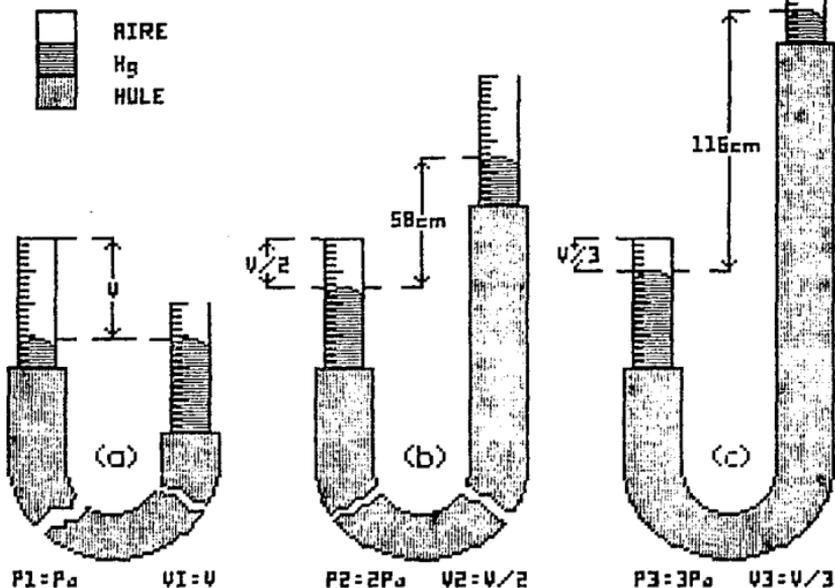
Muévanse los dos tubos de vidrio hasta que el menisco del mercurio en ambos se encuentre a la misma altura. Se mide entonces el volumen del tubo cerrado que se encuentra lleno de aire (Fig. 4a).

En seguida, súbese el tubo de vidrio abierto, hasta que el menisco del mercurio se encuentre 50 cm arriba del que contiene el tubo cerrado, si el experimento se hace en la Ciudad de México. Al medir el volumen de la parte del tubo cerrado que está lleno de aire, se ve que disminuyó a la mitad (Fig. 4b).

Si después se sube más el tubo abierto, hasta que el nivel del mercurio que contiene se encuentre a 116 cm sobre el del

contenido en el tubo cerrado y se mide el volumen de la parte llena de aire del tubo cerrado, se observará que disminuye a la tercera parte (Fig. 4c).

Figura No.4

COMPROBACION DE LA
LEY DE BOYLE Y MARIOTTE

Este experimento comprueba la Ley de Boyle, porque cuando el nivel del mercurio en ambos tubos es el mismo, la presión que el mercurio ejerce sobre el aire confinado es igual a la que el aire ejerce sobre él (Fig. 4a), la cual es la presión atmosférica, que en México corresponde a 58 cm de mercurio, mientras que al nivel del mar es de 76 cm.

Al subir el tubo 58 cm (Fig 4b), de acuerdo con la Ley Fundamental de la Hidrostática, la presión que el mercurio ejerce sobre el aire encerrado se duplica, con lo que su volumen disminuye a la mitad, comprobándose así la Ley de Boyle y Mariotte.

De la misma manera al aumentar la altura del mercurio otros 50 cm (Fig. 4c), la presión que ejerce al aire encerrado es triple, por lo que el volumen de éste disminuye a la tercera parte, con lo que también se comprueba la ley en cuestión.

Esta ley es cierta sólo si la temperatura del gas no varía, si las presiones a las que se trabaja no son demasiado altas y si la temperatura de trabajo no es muy cercana a aquella en la que el gas se convierte en líquido.

IV.3 PARTES CONSTITUTIVAS DEL EQUIPO

De acuerdo con la figura del Diagrama No. 1, el porosímetro de Boyle de baja presión consta de las siguientes partes:

Comenzando de derecha a izquierda se encuentra la Celda porta-muestras (1) de vidrio que admite muestras hasta de 1½" de diámetro y longitud de 3", y que en la parte superior tiene una Válvula (2) que comunica a la atmósfera. En la parte inferior se encuentra una Bureta de Vidrio de 50 cm³. a la que se le denominará Bureta Derecha (3), en esta Bureta se pueden hacer lecturas de 0.1 cm³ y se pueden aproximar valores hasta 0.05 cm³.

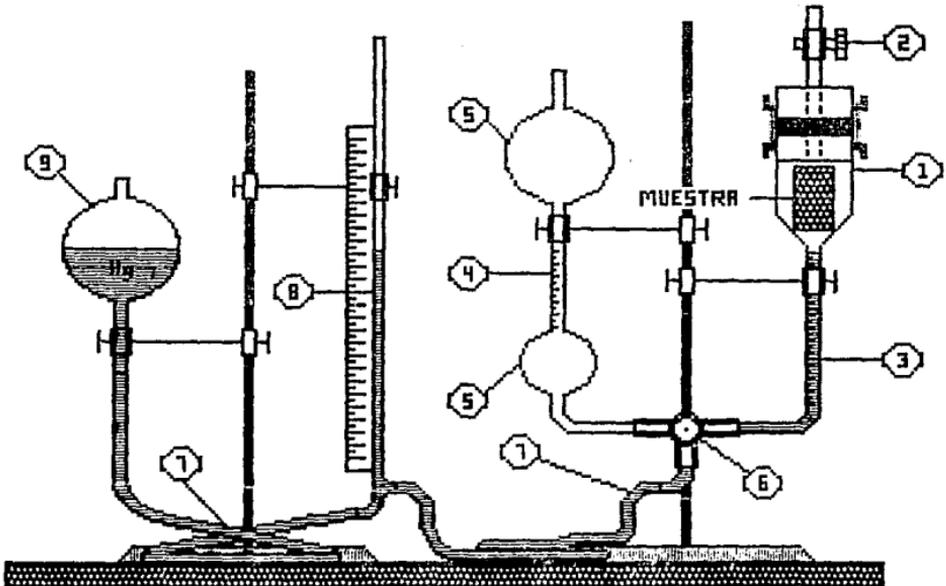
La Bureta Derecha (3) está comunicada con la Bureta Izquierda (4) de 50 cm³, que tiene dos Bulbos de Expansión (5), a través de una Válvula de vidrio de tres pasos o tres vías (6). En el otro extremo la válvula está conectada a una Manguera de Hule (7) que está unida a un tubo de vidrio de ½" de diámetro, el cual actúa como un Manómetro (8) dado que se encuentra junto a una regla graduada en cm (metro). Se logran hacer lecturas hasta de 0.1 cm y se logran aproximaciones hasta 0.01 cm.

Este Manómetro (8) está unido a su vez con un Bulbo Nivelador de vidrio (9) por una Manguera de Hule (7). El Bulbo Nivelador (9) es un matraz redondo de 200 cc que contiene mercurio y descansa sobre un soporte móvil, el cual tiene un tornillo micrométrico para elevar o bajar el bulbo longitudes pequeñas.

Diagrama No.1

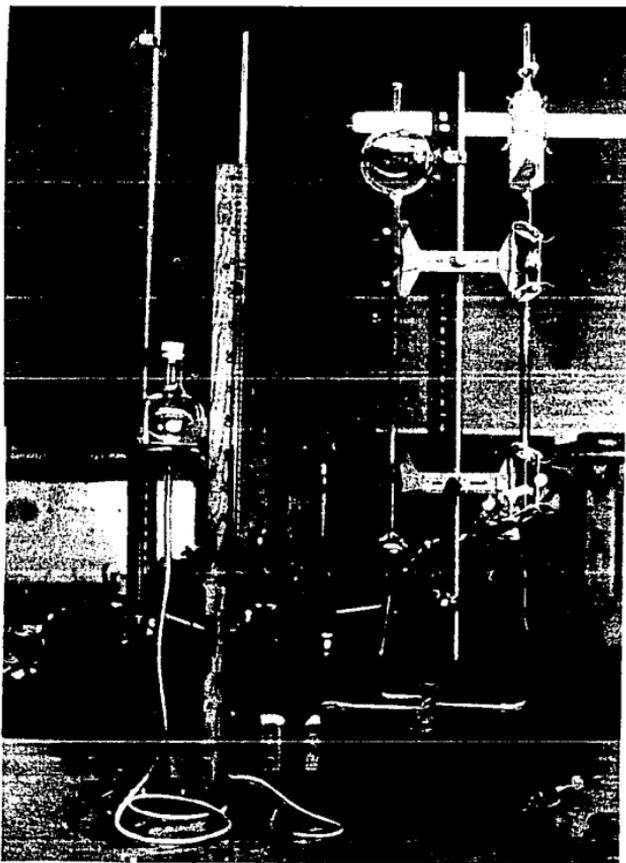
DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL POROSIMETRO
DE BAJA PRESION TIPO BOYLE

- 1) CELDA PORTA-MUESTRAS
- 2) VALVULA A LA ATMOSFERA
- 3) BURETA DERECHA
- 4) BURETA IZQUIERDA
- 5) BULBO DE EXPANSION
- 6) VALVULA DE TRES PASOS
- 7) MANGUERA DE HULE
- 8) MANOMETRO
- 9) BULBO NIVELADOR



El porosímetro tipo Boyle de baja presión utilizado en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería se muestra en la siguiente Fotografía No. 1:

Fotografía No. 1



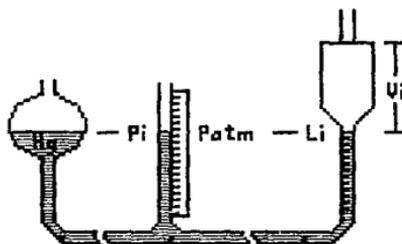
IV.4 DEDUCCION DE LA ECUACION DEL POROSIMETRO

Partiendo del principio de Boyle:

$$P_i V_i = P_f V_f \quad \text{----- (IV.4.1)}$$

Para unas condiciones iniciales:

- Presión Inicial, $P_i = P_{atm}$
- Volumen Inicial, $V_i = ?$



Para unas condiciones finales:

- Presión Final, $P_f = D$

Si se parte de: $P_f = P_i - DP$

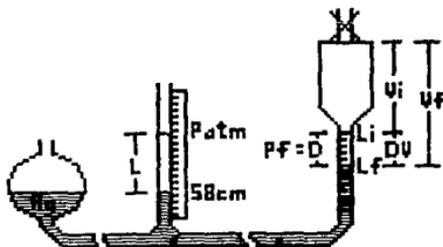
Donde: $DP = L - D$

Sustituyendo: $P_f = P_i - (L - D)$

Si se toma : $L = 58 \text{ cm de Hg} = P_i = P_{atm}$

Queda : $P_f = D$

- Volumen Final, $V_f = V_i + DV$



Substituyendo lo anterior en la ecuación (IV.4.1):

$$P_{atm} V_i = D (V_i + DV)$$

Reacomodando los miembros y despejando V_i queda:

$$V_i P_{atm} = D V_i + D DV$$

$$V_i P_{atm} - V_i D = D DV$$

$$V_i (P_{atm} - D) = D DV$$

$$V_i = \frac{D DV}{P_{atm} - D}$$

$$V_i = \frac{DV}{\frac{P_{atm}}{D} - 1} \quad \text{-----} \quad (IV.4.2)$$

Se sabe que:

$$m = D / DV \text{ (cm/cm}^3\text{)} \quad \text{-----} \quad (IV.4.3)$$

Donde :

m = Constante de la Bureta
 D = Distancia (cm)
 DV = Incremento de Volumen (cm³)

Despejando D de la ecuación (IV.4.3):

$$D = m DV$$

Substituyendo D en la ecuación (IV.4.2):

$$V_i = \frac{DV}{\frac{P_{atm}}{m DV} - 1} \quad \text{-----} \quad (IV.4.4)$$

La ecuación (IV.4.4) es la ecuación del porosímetro tipo Boyle de baja presión, que será utilizada para el cálculo del Volumen de aire en la Celda portamuestras a unas condiciones iniciales. Según estas condiciones se puede conocer el Volumen de Celda Vacía (V_{cv}) o el Volumen de Celda con Muestra (V_{cm}), siempre y cuando, se cumpla la condición de que $L = 58$ cm de Hg, que corresponde a la presión atmosférica local.

CAPITULO V

PROCEDIMIENTO PARA OBTENER LA
POROSIDAD EFECTIVA CON EL EQUIPO
TIPO BOYLE DE BAJA PRESION

El procedimiento para obtener la porosidad efectiva, como se indic6 anteriormente en forma resumida, consiste en determinar el volumen de s6lidos (V_s) a trav6s del c6lculo del volumen de celda vacia (V_{cv}) y el calculo del volumen de celda con muestra (V_{cm}), y adem6s obtener el volumen de roca (V_r). Una vez realizado lo anterior se utiliza la siguiente formula para determinar la porosidad de la roca :

$$\phi_e = \frac{V_r - V_s}{V_r} * 100$$

Donde:

ϕ_e = porosidad efectiva, en porciento.

Antes de describir el procedimiento para la medici6n de la porosidad utilizando el porosimetro de baja presi6n, hay que definir las tres posiciones que se van a tener:

Posici6n 1 .- Se dice que se tiene esta posici6n cuando el nivel de mercurio est6 en la Bureta Derecha (3) con una lectura cercana o en cero cm^3 , la cual es conocida como lectura inicial (L_i), y en la escala del tubo de vidrio (8) est6 en el nivel de referencia (NR), en cm. Esto se realiza con la V6lvula a la atm6sfera (2) abierta (ver Diagrama No. 2).

Posici6n 2 .- Se tiene la posici6n 2 cuando el nivel de mercurio en el tubo de vidrio (8) baje en una longitud (L) cualquiera, ocasionando una DP (disminuyendo el nivel de Hg), por facilidad se recomienda que sean 50 cm de Hg que corresponde a la presi6n atmosf6rica local. Para que exista una caida de presi6n es necesario que la V6lvula a la atm6sfera (2) est6 cerrada (ver Diagrama No. 2).

Posici6n 3 .- Se tendr6 la posici6n 3 cuando el nivel de mercurio alcance el sello de la V6lvula a la atm6sfera (2) (ver Diagrama No. 4).

Las posiciones 1 y 2 son necesarias para determinar el volumen de s6lidos (V_s) y la posici6n 3 para el volumen total de roca (V_r).

V.1 DETERMINACION DEL VOLUMEN DE CELDA VACIA

Ver Diagrama No. 2

PRIMER PASO.- Verificar que exista comunicación entre la Bureta Derecha (3) y el Bulbo Nivelador (9), también se debe verificar que esté abierta la Válvula a la atmósfera (2) para que exista una presión en la Celda portamuestras (1) igual a la atmosférica (palanca de la válvula en posición vertical).

Se establece un nivel de referencia (cero), abajo del recipiente portamuestras, lo cual se logra moviendo el Bulbo Nivelador hacia arriba hasta que se lea una lectura igual a cero (Posición 1) y de inmediato se toma la lectura marcada en la bureta en la que se encuentra la Celda portamuestras, que correspondera a la lectura inicial (L_i).

SEGUNDO PASO.- Se cierra la Válvula (2) que comunica a la atmósfera (palanca de la válvula en posición horizontal), con ello se atrapa un volumen de aire a presión atmosférica, y se provoca una caída de presión con lo que el aire se expande, esto se logra bajando el Bulbo Nivelador (9) una longitud (L) de 58 cm de mercurio (Posición 2).

Puede ser un valor cualquiera, aunque si $L = 58$ cm se simplifican los cálculos. Esta longitud se observa en el Manómetro (8), que corresponde a la presión atmosférica local (P_{atm}). De inmediato se toma el valor marcado en la Bureta de la Derecha (3) que corresponde a la lectura final (L_f).

TERCER PASO.- El incremento en el volumen (DV) se obtiene haciendo la diferencia entre la lectura inicial (L_i) y la lectura final (L_f).

$$P_i = P_{atm} = 58 \text{ cm de Hg}$$

$$DV = L_i - L_f$$

CUARTO PASO.- Se determina la distancia (D) entre el nivel de referencia y el punto o nivel marcado en la segunda posición.

$$P_f = D$$

Donde:

$$D = m DV$$

$$m = D / DV \text{ (cm/cm}^3\text{)}$$

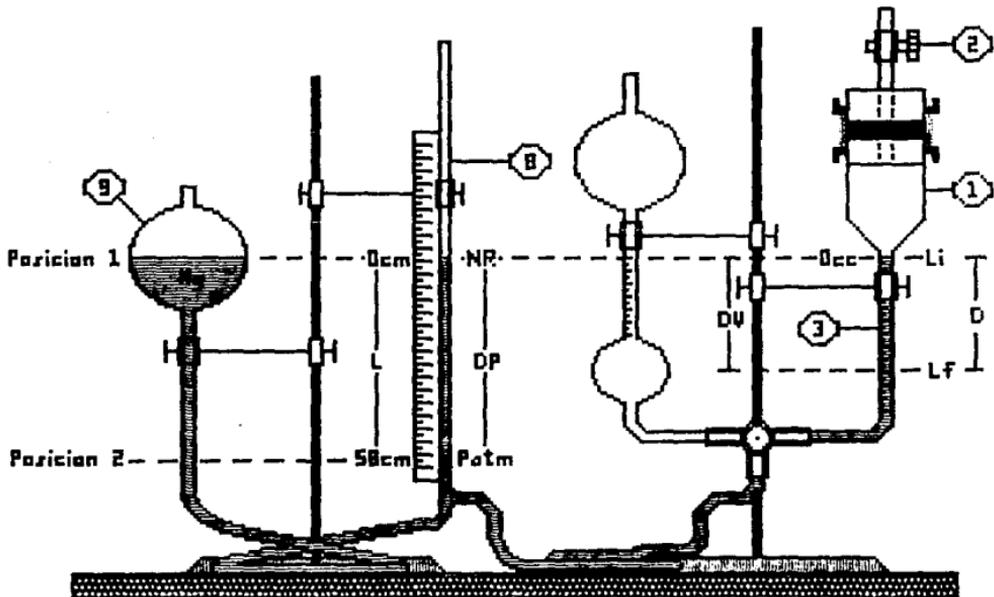
QUINTO PASO.- Se determina el volumen de la celda vacía (Vcv) a través de la siguiente fórmula:

$$V_{cv} = \frac{DV}{\frac{P_{atm}}{m DV} - 1}$$

Esta ecuación se cumple solo si:

$$L = 58 \text{ cm de Hg} \quad \circ \quad L = P_{atm} \text{ local}$$

Diagrama No.2 DETERMINACION DEL VOLUMEN DE CELDA VACIA



V.2 DETERMINACION DEL VOLUMEN DE CELDA CON MUESTRA

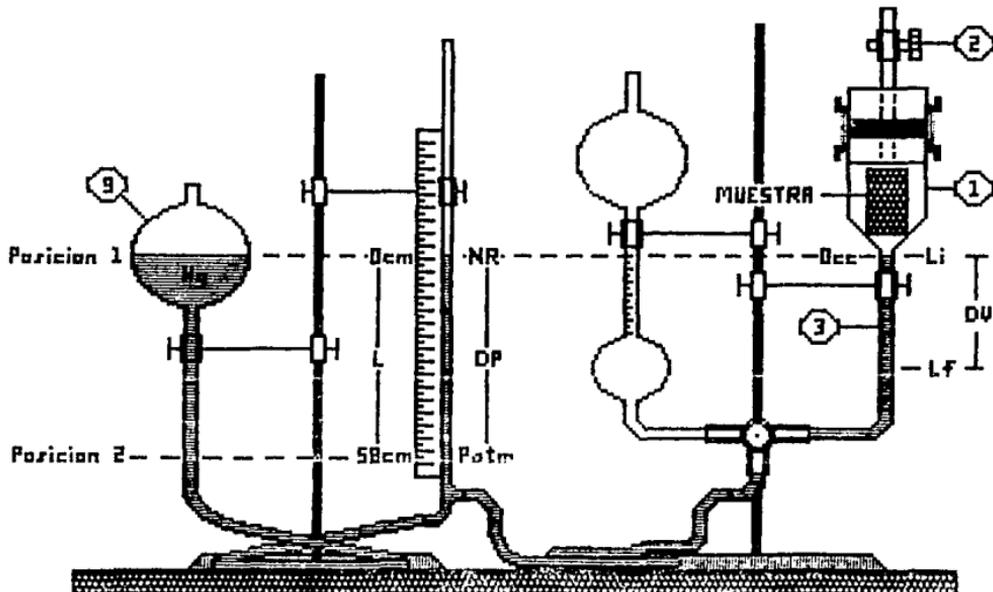
Ver Diagrama No. 3

Se introduce la muestra en la Celda portamuestras (1) y se asegura firmemente la tapa.

PRIMER PASO.- Con la Válvula (2) abierta a la atmósfera se establece el nivel de referencia (Posición 1) en la Bureta Derecha (3). Este nivel de referencia debe ser el mismo que se utilizó para determinar el volumen de la celda vacía. Se toma la lectura inicial (Li), igual que en el procedimiento utilizado para el cálculo del volumen de celda vacía.

SEGUNDO PASO.- Se cierra la Válvula a la atmósfera (2) y se baja el Bulbo Nivelador (9) hasta la presión atmosférica local (Posición 2), de inmediato se toma el valor de la lectura final (Lf).

Diagrama No.3 DETERMINACION DEL VOLUMEN DE CELDA CON MUESTRA



TERCER PASO.- Se determina el incremento de volumen (DV). Con la diferencia entre L_i y L_f .

CUARTO PASO.- Se calcula el volumen de celda con muestra (V_{cm}) con la ecuación :

$$V_{cm} = \frac{DV}{\frac{P_{atm}}{m \cdot DV} - 1}$$

Esta ecuación se cumple solo si:

$$L = 58 \text{ cm de Hg} \quad \text{o} \quad L = P_{atm} \text{ local}$$

La constante de la bureta (m) será la que ya se calculó.

V.3 DETERMINACION DEL VOLUMEN DE SÓLIDOS

Para determinar el Volumen de Sólidos es necesario haber obtenido previamente los volúmenes de celda vacía y con muestra, ya que con la diferencia de estos dos se conoce el volumen de sólidos.

$$V \text{ de sólidos} = V \text{ celda vacía} - V \text{ celda con muestra}$$

V.4 DETERMINACION DEL VOLUMEN DE ROCA

V.4.1 Se puede hacer directamente, a partir de sus dimensiones, si la muestra tiene forma regular (cilíndrica por ejemplo).

Fórmula utilizada, en caso de ser cilíndrica la muestra:

$$V_r = \pi \frac{d^2}{4} h$$

Donde:

$$\pi = P_i = 3.1416$$

$$d = \text{Diámetro de la muestra (cm).}$$

$$h = \text{Altura o Longitud de la muestra (cm).}$$

V.4.2 En el Laboratorio también se puede utilizar el equipo tipo Boye de baja presión para conocer el volumen de roca. Se basa en el principio de Arquímedes.

Ver Diagrama No. 4

PRIMER PASO.- Con la Válvula (2) abierta a la atmósfera, se establece un nivel de referencia (Posición 1) en la Bureta de la Derecha (3) moviendo el Bulbo Nivelador (9). Se toma la lectura inicial (L1).

SEGUNDO PASO.- Se continúa con la Válvula a la atmósfera (2) abierta, se cubre completamente de mercurio la muestra moviendo el Bulbo Nivelador (9) hacia arriba (Posición 3), revisando que no se dejen burbujas de aire dentro del mercurio. Posteriormente se cierra la Válvula a la atmósfera (2) por seguridad y se gira la Válvula de tres pasos (6) para aislar el Bulbo Nivelador (9) y comunicar las dos buretas: Bureta Derecha (3) y Bureta Izquierda (4).

Se abre la Válvula a la atmósfera (2) y se baja el nivel de mercurio de la Bureta Derecha (3) hasta el nivel de referencia. Esta operación se hace manejando cuidadosamente la Válvula de tres pasos (6) haciendo pasar el mercurio de la Bureta Derecha (3) hacia la Bureta Izquierda (4). Cuando el nivel de referencia es alcanzado, se corta el paso de mercurio y se lee el volumen de mercurio (Lv) indicado en la Bureta Izquierda (4).

Para obtener el volumen de mercurio drenado de la Bureta Derecha (3) se debe sumar: el volumen de mercurio muerto más la diferencia entre un valor constante de 50 y el volumen de mercurio (Lv) leído en la misma bureta, ya que ésta tiene las graduaciones de 0 a 50 cm³.

$$V \text{ de Hg drenado} = V \text{ de Hg muerto} + (50 - L_v)$$

El volumen de Hg muerto, para el equipo que se tiene en el Laboratorio de Yacimientos de la Facultad de Ingeniería es:

$$V \text{ de Hg muerto} = 82 \text{ cm}^3$$

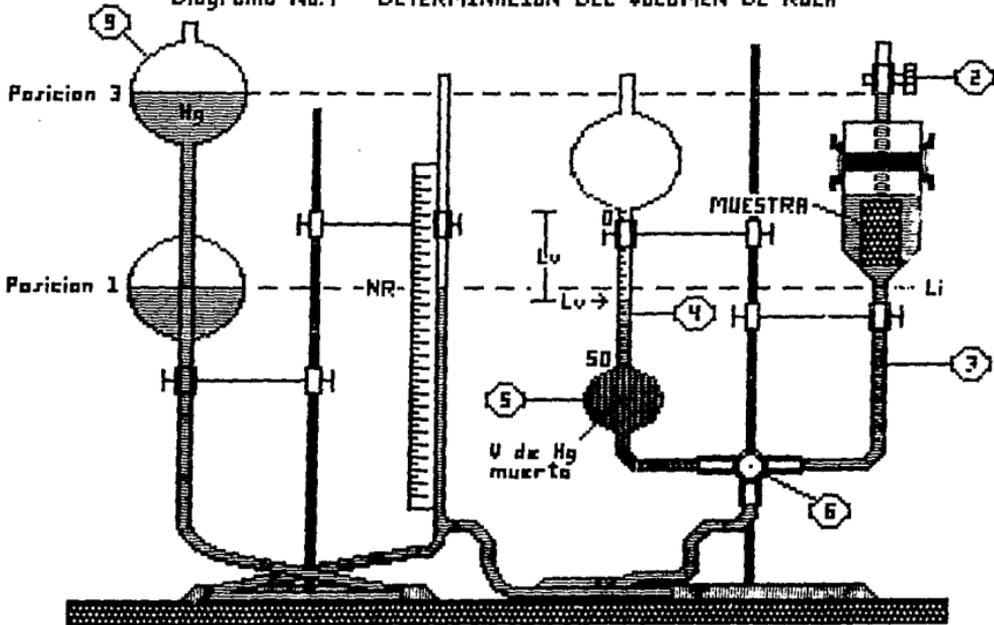
Este volumen se refiere al volumen de mercurio que está contenido desde la marca de 50 cm³ de la Bureta Izquierda (4) hasta el sello de la Válvula de tres pasos (6), incluyendo el Bulbo de expansión (5). Este valor será constante, siempre y cuando no se cambie la manguera o el Bulbo de expansión (5) ubicado en la parte inferior de la Bureta Izquierda (4), ya que cambiaría el valor del volumen de mercurio muerto.

TERCER PASO.- Se determina el volumen de roca por medio de la siguiente expresión:

$$V_r : V \text{ de celda vacía} - V \text{ de Hg drenado}$$

El volumen de celda vacía se obtuvo con la Ley de Boyle, de acuerdo al procedimiento explicado anteriormente.

Diagrama No.4 DETERMINACION DEL VOLUMEN DE ROCA



V.5 EJEMPLO PRACTICO

Con el fin de ejemplificar lo anterior se presentan los resultados de una medición de porosidad en el laboratorio. Tomando una muestra del Laboratorio de Yacimientos de la Facultad de Ingeniería y utilizando el equipo tipo Boyle de baja presión para determinar la porosidad efectiva, se obtuvo:

Muestra Cilindrica de :

$$d = 2.54 \text{ cm}$$

$$h = 4.26 \text{ cm}$$

DATOS, CALCULOS Y RESULTADOS

* Determinación del Volumen de Celda Vacía (Vcv)

Datos Iniciales : $P_i = P_{atm} = 58 \text{ cm}$

$$L_i = 1.5 \text{ cm}^3$$

Datos Finales : $L_f = 40.3 \text{ cm}^3$

$$D = 44.3 \text{ cm}$$

Cálculos : $DV = 40.3 - 1.5 = 38.8 \text{ cm}^3$

$$m = \frac{44.3}{38.8} = 1.1417$$

$$V_{cv} = \frac{38.8}{\frac{58}{1.1417 * 38.8} - 1} = 125.44 \text{ cm}^3$$

Resultado : $V_{cv} = \underline{\underline{125.44 \text{ cm}^3}}$

* Determinación del Volumen de Celda con Muestra (Vcm)

Datos Iniciales : $L_i = 1.5 \text{ cm}^3$

$$P_i = P_{atm} = 58 \text{ cm}$$

Datos Finales : $L_f = 39.1 \text{ cm}^3$

$$m = 1.1417$$

Cálculos : $DV = 39.1 - 1.5 = 37.6 \text{ cm}^3$

$$V_{cm} = \frac{37.8}{\frac{58}{1.1417 \times 37.8} - 1} = 109.899 \text{ cm}^3$$

Resultado : $V_{cm} = \underline{\underline{109.898 \text{ cm}^3}}$

* Determinación del Volumen de Sólidos (V_s)

Datos : $V_{cv} = 125.44 \text{ cm}^3$

$V_{cm} = 109.898 \text{ cm}^3$

Cálculo : $V_s = 125.44 - 109.898 = 15.54 \text{ cm}^3$

Resultado : $V_s = \underline{\underline{15.54 \text{ cm}^3}}$

* Determinación del Volumen de Roca (V_r)

Se puede obtener por medio de dos métodos:

- Por medio de su Geometría :

Datos : $d = 2.52 \text{ cm}$

$h = 4.24 \text{ cm}$

Cálculo : $V_r = \frac{\pi (2.52)^2 \times 4.24}{4} = 21.15 \text{ cm}^3$

Resultado : $V_r = \underline{\underline{21.15 \text{ cm}^3}}$

- Por medio del Porosímetro tipo Boyle de baja presión :

Datos : $V_v = 27.6 \text{ cm}^3$

$V_{\text{Hg muerto}} = 82 \text{ cm}^3$

$V_{cv} = 125.44 \text{ cm}^3$

Cálculo : $V_{\text{Hg drenado}} = 82 + (50 - 27.6) = 104.4 \text{ cm}^3$

$V_r = 125.44 - 104.4 = 21.04 \text{ cm}^3$

Resultado : $V_r = \underline{\underline{21.04 \text{ cm}^3}}$

* Determinación de la Porosidad (ϕ)

- Utilizando el V_r obtenido a partir de sus dimensiones :

Datos : $V_s = 15.54 \text{ cm}^3$

$V_r = 21.15 \text{ cm}^3$

Cálculo : $\phi = \frac{21.15 - 15.54}{21.15} \times 100 = 26.52 \%$

Resultado : $\phi = \underline{\underline{26.52 \%}}$

- Utilizando el V_r obtenido con el equipo tipo Boyle de Baja Presión :

Datos : $V_s = 15.54 \text{ cm}^3$

$V_r = 21.04 \text{ cm}^3$

Cálculo : $\phi = \frac{21.04 - 15.54}{21.04} \times 100 = 26.14 \%$

Resultados: $\phi = \underline{\underline{26.14 \%}}$

V.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL METODO Y DEL EQUIPO

Algunas de las ventajas y desventajas que se tienen al utilizar el porosímetro de baja presión descrito en este trabajo son las siguientes:

VENTAJAS

- Como se puede observar en la Fotografía 1, el equipo de baja presión es fácil de construir y tiene un precio bajo ya que todos sus elementos son de cristal y podría utilizarse material de deshecho.
- Es simple y rápida su operación y proporciona resultados con buena aproximación.
- Se pueden hacer mediciones en muestras irregulares.
- Sin sacar la muestra se puede medir el volumen de sólidos y el de roca.
- La muestra no se destruye y puede utilizarse en otras pruebas de laboratorio.
- El tiempo de medición es muy corto, puesto que sólo hay que realizar cambios de presión y tomar lecturas de volumen.
- Con el aparato se obtienen valores repetitivos de porosidad.

DESVENTAJAS

- El equipo es muy frágil debido a que, en su mayor parte, está constituido por elementos de cristal.
- Este tipo de aparato está limitado a núcleos pequeños, debido a que está construido de cristal.
- Como se utiliza aire se puede condensar vapor de agua y esto puede ocasionar alteración de la porosidad, cuando las muestras son de rocas arcillosas, ya que éstas se hidratan.
- No se pueden utilizar muestras poco consolidadas o deleznable.
- La muestra se pone en contacto con mercurio y esto podría generar alguna contaminación.

C A P I T U L O V I

ERRORES QUE SE PUEDEN COMETER
AL EFECTUAR LA MEDICION DE LA
POROSIDAD EFECTIVA

VI.1 ERRORES INHERENTES A LA MEDICION

La porosidad que se mide en el laboratorio puede no ser representativa de la del yacimiento, debido a que la roca se somete a cambios grandes de condiciones ambientales al pasar del interior del yacimiento a la superficie y posteriormente al laboratorio. Estas diferencias en el valor de la porosidad no dependen de las medidas que se hagan con algun equipo en el laboratorio.

En el laboratorio se debe tener mucho cuidado al medir la porosidad, ya que se pueden cometer errores al leer de algún dispositivo de medición un dato que representa alguna magnitud física, que interviene en las ecuaciones correspondientes.

Los errores que interesan en este trabajo son aquellos que se generan al medir los parámetros que intervienen en las expresiones correspondientes al equipo tipo Boyle de baja presión, que son: el Incremento del volumen (DV), la Presión atmosférica (Patm), la Longitud de la muestra (L) y el Diámetro de la muestra (d). Estos parámetros están contenidos en las siguientes fórmulas.

$$V_{cm} \text{ o } V_{cv} = \frac{DV}{\frac{Patm}{m DV} - 1}$$

$$V_r = \pi \frac{d^2 L}{4}$$

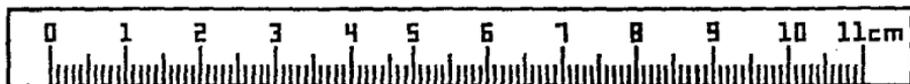
A continuación se detallan los errores que se pueden cometer así como su origen.

VI.2 ERRORES EN LA MEDICION DEL DIAMETRO Y DE LA LONGITUD

Al momento de tomar las medidas de diámetro y longitud de las muestras se pueden cometer errores, los cuales pueden ser debidos a:

a) Que las mediciones se hagan con elementos poco precisos o que se haga una mala observación al tomar la medida con un vernier (Fotografía No. 2).

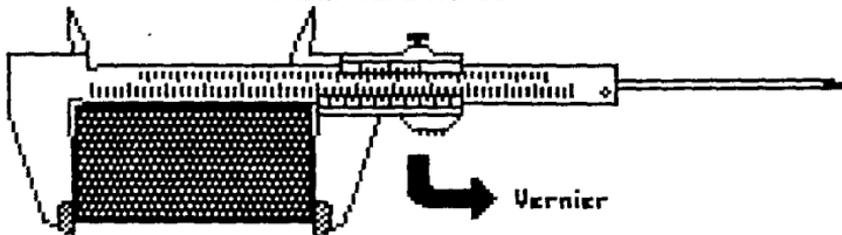
POCA PRECISION



Reglo Graduado



MALA OBSERVACION



Vernier

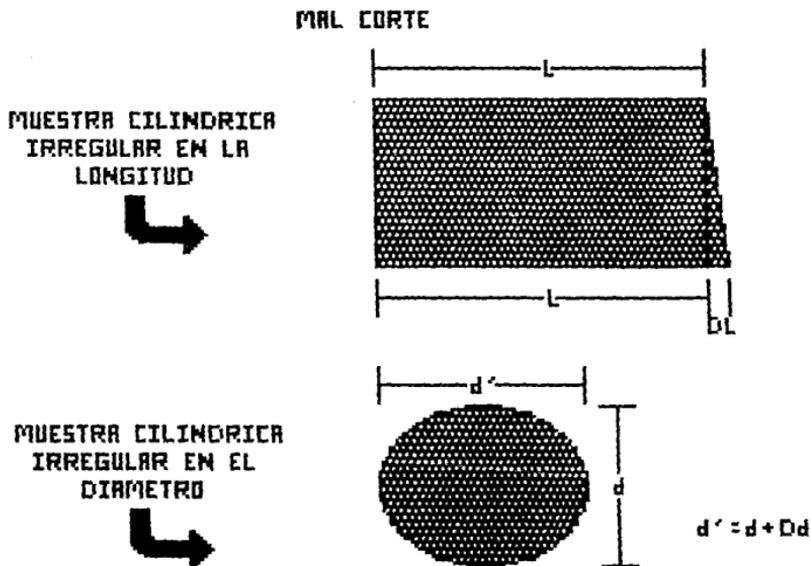
3.29 Correcto

3.32 Incorrecto

Fotografía No. 2



b) Que la muestra con geometría regular realmente no lo sea, esto origina que las dimensiones varíen y las magnitudes dependerán del lugar en el que se coloque el vernier (Fotografía No. 3).



Fotografía No. 3

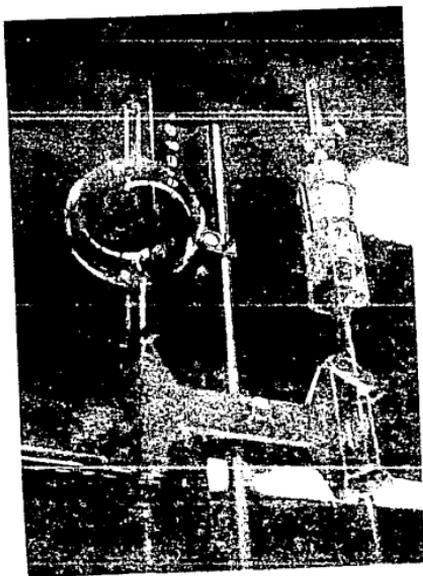


VI.3 ERRORES EN LA MEDICION DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN

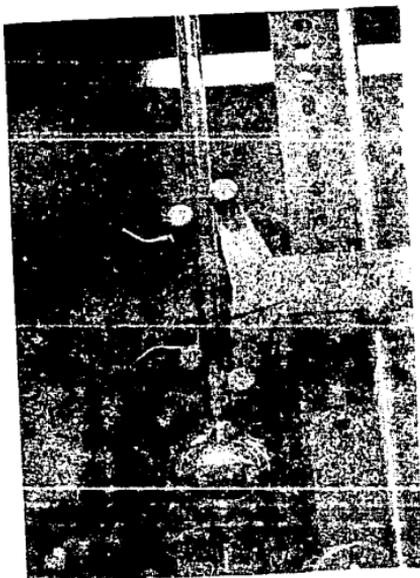
Los errores que se pueden tener al medir el Incremento del Volumen pueden ser causados por:

- a) Que no tenga un buen sello la Celda portamuestras y, por consiguiente, permita la entrada de aire al provocar el incremento del volumen (Fotografia No. 4).
- b) Que existan burbujas de aire en el mercurio y debido a su alta compresibilidad originan variaciones en los incrementos de volumen.
- c) Que existan fugas de mercurio en el sistema.
- d) Que no se observe correctamente la lectura en la Bureta graduada (Fotografia No. 5).

Fotografia No. 4



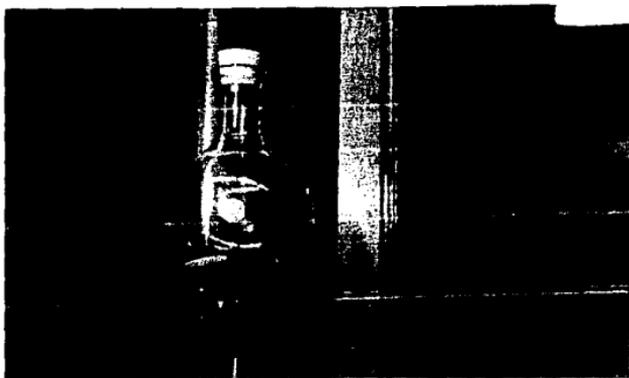
Fotografia No. 5



VI.4 ERRORES EN LA PRESION ATMOSFERICA

Se pueden cometer errores al medir la Presión Atmosférica si no se tiene cuidado al tomar correctamente la lectura en la regla graduada que está a un lado del tubo de vidrio (Fotografía No 6).

Fotografía No. 6



VI.5 TIPOS DE ERRORES

La magnitud del error generado por alguna de las fuentes mencionadas anteriormente se puede conocer a través del error absoluto o el error relativo.

- *El error absoluto se define como la diferencia en valor absoluto de un valor cualquiera x y una aproximación a este valor representada por x_1 :*

$$ea = |x - x_1|$$

- *El error relativo se define como el cociente del error absoluto entre el valor absoluto de x , expresado en por ciento (%):*

$$er = \left| \frac{x - x_1}{x} \right| * 100$$

El aspecto más importante de este trabajo fue analizar el efecto de los distintos errores mencionados sobre los valores de porosidad medidos.

Se consideró un rango de porosidad de 1 a 30 % para dos tamaños de muestras cilíndricas (2.54 cm de diámetro y 3.81 cm de longitud en un caso y en el otro 3.81 cm de diámetro y 3.81 cm de longitud).

Para el análisis se consideraron variaciones en más y en menos de las medidas reales, con diferentes incrementos de acuerdo a las características de los elementos medidores en el aparato. Estos datos se presentan en la siguiente tabla.

T A B L A 2

PARAMETROS ANALIZADOS, RANGOS DE VARIACION DE LOS ERRORES E INCREMENTOS DE LAS VARIACIONES

PARAMETRO ANALIZADO	RANGO DE VARIACION DEL ERROR	INCREMENTO DE VARIACION
DIAMETRO	+ 0.15 cm - 0.15 cm	0.01 cm
LONGITUD	+ 0.15 cm - 0.15 cm	0.01 cm
INCREMENTO DEL VOLUMEN	+ 0.5 cm ³ - 0.5 cm ³	0.05 cm ³
PRESION ATMOSFERICA	+ 0.2 cm - 0.2 cm	0.01 cm ³

Para el procesamiento rápido de la información se preparó un programa de cómputo, cuyas características se explican en el siguiente capítulo.

CAPITULO VII

PROGRAMA DE COMPUTO

VII.1 PROCEDIMIENTO

Este programa fue realizado con el propósito de reducir el tiempo y evitar errores en los cálculos.

El programa requiere que se fijen tres parámetros que permanezcan constantes durante toda la corrida y estos son: Valor de la Constante de la Bureta (M); Presión atmosférica Local (Pa) y Volumen de la Celda Vacía (Vcv).

Asimismo requiere las dimensiones de la muestra por analizar, esto es: Diámetro (D) y Longitud (L), dados en cm. En el siguiente paso pregunta la porosidad y con estos valores calcula: Volumen de roca (Vr); Volumen de Celda con Muestra (Vcm) y el valor del Incremento del Volumen (DV), que es calculado de la siguiente manera:

$$DV = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

Donde:

$$\begin{aligned} A &= 1 \\ B &= V_{cm} \\ C &= \frac{-V_{cm} * P_a}{M} \end{aligned}$$

Se toma el valor positivo de la raíz.

Una vez realizado esto, comienza a calcular los errores que se cometen en las mediciones de:

- 1.) El Diámetro, con errores en la medición de ± 0.15 cm e incrementos de 0.01 cm.
- 2.) La Longitud, con errores en la medición de ± 0.15 cm e incrementos de 0.01 cm.
- 3.) Incremento del volumen, con errores en la medición de ± 0.5 cm³ e incrementos de 0.05 cm³.
- 4.) Presión Atmosférica Local, con errores en la medición de ± 0.2 cm e incrementos de 0.01 cm.

El programa proporciona el valor del parámetro analizado junto con la Porosidad (X) y el Porcentaje de Error cometido (Y). Ya que se obtuvieron todos los valores para esta porosidad, se pregunta una nueva y así sucesivamente hasta agotar el rango de porosidad, posteriormente se dan los valores de la siguiente muestra.

V I I . 2
D I A G R A M A
D E
F L U J O

**CALCULO DE PRUEBAS DE SENSIBILIDAD
EN LA POROSIDAD EFECTIVA**

PI=3.1416

M, PR Y UCV

NM, D Y L

PORR (%)

POR=PORR/100

UR=(PI*D^2*L)/4

US=-(POR*UR-UR)

UCM=UCV-US

$X=(UCM^2-4*((-UCM*PR)/M))^0.5$

DV=(-UCM+X)/2

DIAMETRO

FOR I=-.15 TO .15 STEP .01

DI=D+I

UR=(PI*DI^2*L)/4

UCM=DV/((PR/(M*DV))-1)

US=UCV-UCM

POR=FIX(((UR-US)/UR)*10000)/100

ER=FIX(ABS((PORR-POR)/PORR)*100)

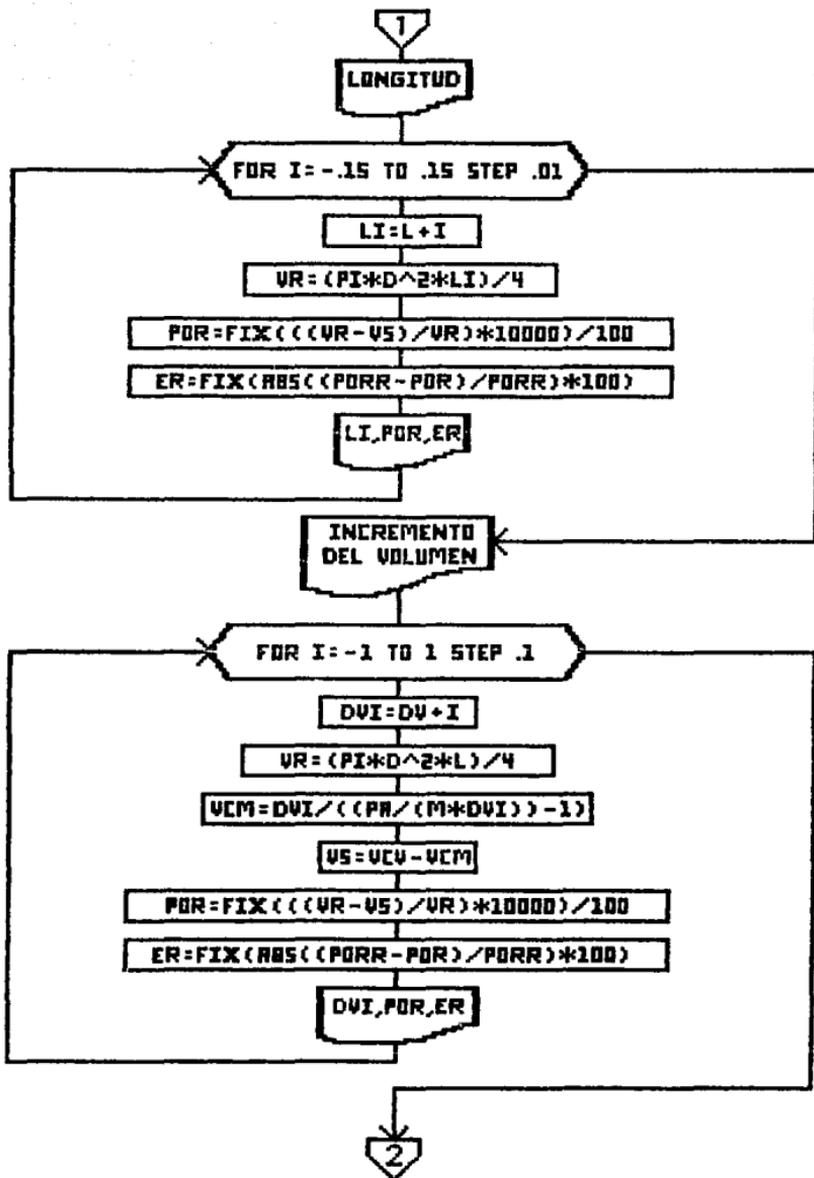
DI,POR,ER

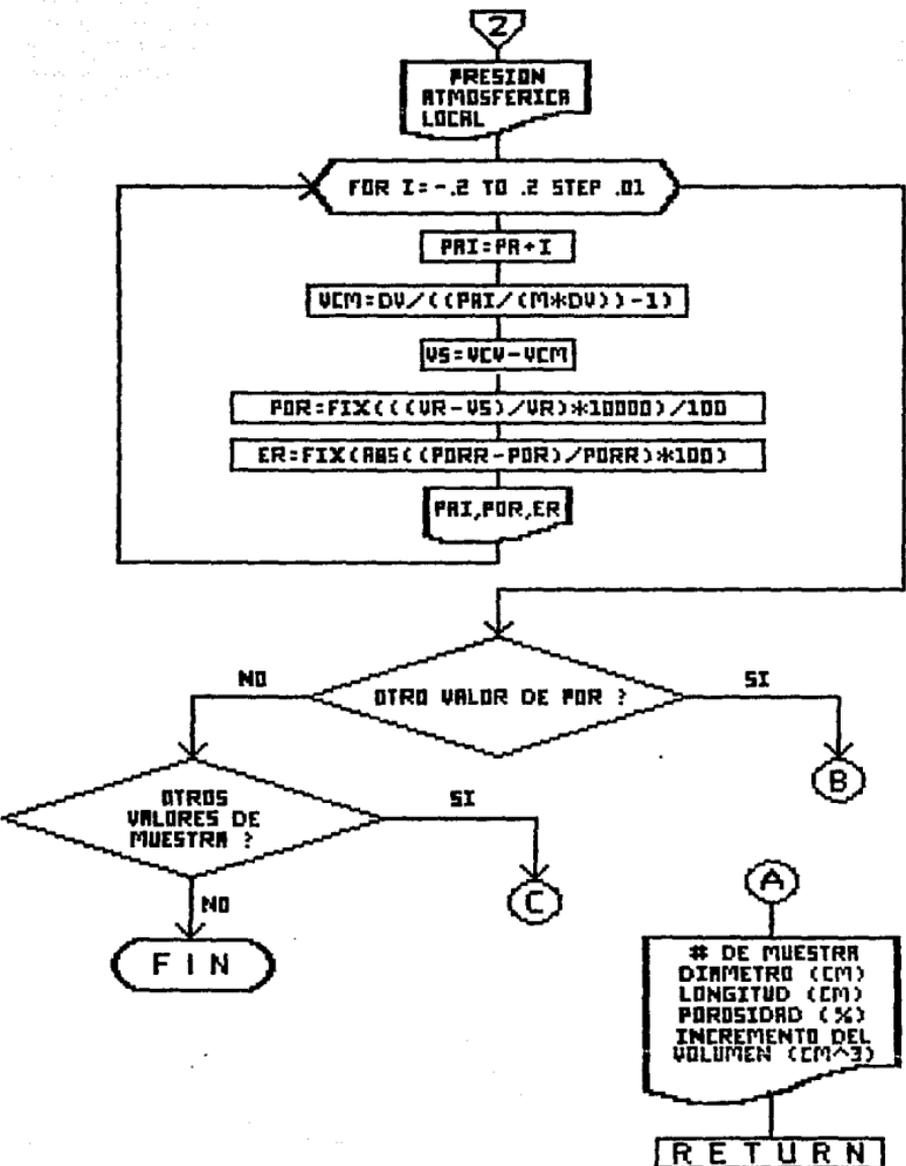
1

C

B

A





V I I . 3
L I S T A D O
D E L
P R O G R A M A

```

10 LPRINT CHR$(14); "*****"
20 LPRINT CHR$(14); "*****"
30 LPRINT CHR$(14); "*****"
40 LPRINT CHR$(14); "*****"
50 LPRINT CHR$(14); "*****"
60 LPRINT CHR$(14); "*****"
70 LPRINT CHR$(14); "*****"
80 LPRINT CHR$(14); "*****"
90 LPRINT CHR$(14); "*****"
100 LPRINT CHR$(14); "*****"
110 LPRINT CHR$(14); "*****"
120 LPRINT CHR$(14); "*****"
130 LPRINT CHR$(14); "*****"
140 LPRINT CHR$(14); "*****"
150 LPRINT CHR$(14); "*****"
160 LPRINT CHR$(14); "*****"
170 LPRINT CHR$(14); "*****"
180 LPRINT CHR$(14); "*****"
190 LPRINT CHR$(14); "*****"
200 LPRINT CHR$(14); "*****"
210 LPRINT CHR$(14); "*****"
220 LPRINT CHR$(14); "*****"
230 LPRINT CHR$(14); "*****"
240 LPRINT CHR$(14); "*****"
250 LPRINT CHR$(14); "*****"
260 LPRINT CHR$(14); "*****"
270 LPRINT CHR$(14); "*****"
280 LPRINT CHR$(14); "*****"
290 LPRINT CHR$(14); "*****"
300 LPRINT CHR$(14); "*****"
310 LPRINT CHR$(14); "*****"
320 LPRINT CHR$(14); "*****"
330 LPRINT
340 LPRINT
350 LPRINT CHR$(14); "D A T O S   G E N E R A L E S : "
360 LPRINT
370 LPRINT
380 P1=3.141592626544
390 INPUT "VALOR DE LA CONSTANTE m DE LA BURETA = ";M
400 LPRINT CHR$(14); "VALOR DE LA CONSTANTE m DE LA BURETA"
410 LPRINT CHR$(14);M
420 LPRINT
430 INPUT "PRESION ATMOSFERICA LOCAL (cm DE Hg) = ";PA
440 LPRINT CHR$(14); "PRESION ATMOSFERICA LOCAL (cm DE Hg)"
450 LPRINT CHR$(14);PA
460 LPRINT
470 INPUT "VOLUMEN DE CELDA VACIA (cm^3) = ";VCV
480 LPRINT CHR$(14); "VOLUMEN DE CELDA VACIA (cm^3)"
490 LPRINT CHR$(14);VCV
500 INPUT "DESEAS CONTINUAR IMPRIENDO (TECLEA CUALQUIER NUMERO): ";SI
510 INPUT "NUMERO DE MUESTRA : ";NM
520 INPUT "DIAMETRO (cm) = ";D
530 INPUT "LONGITUD (cm) = ";L
540 INPUT "VALOR DE LA POROSIDAD (%) = ";PORR
550 POR=PORR/100
560 VR=(P1*D^2*L)/4
570 VS=- (POR*VR-VCV)
580 VCM=VCV-VS
590 X=(VCM^2-4*(-VCM+PA)/M)^.5
600 DV=(-VCM+X)/2
610 GOSUB 1450
620 LPRINT CHR$(14); "D I A M E T R O"
630 LPRINT CHR$(14); "(--- 0.15 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm)"
640 LPRINT

```

```

650 LPRINT
660 LPRINT " ", "DIAMETRO", "POROSIDAD", " ERROR"
670 LPRINT " ", " (cm)", " (%)", " (%)"
680 LPRINT " ", "-----", "-----", "-----"
690 LPRINT
700 FOR I=-.15 TO .15 STEP .01
710 DI=D+I
720 VR=(PI*DI^2*L)/4
730 VCM=DV/((PA/(M*DV))-1)
740 VS=VCV-VCM
750 POR=FIX(((VR-VS)/VR)*10000)/100
760 ER=FIX(ABS((PORR-POR)/PORR)*100)
770 LPRINT ,DI,POR,ER
780 NEXT I
790 INPUT"DESEAS CONTINUAR IMPRIMIENDO (TECLEA CUALQUIER NUMERO): ";SI
800 GOSUB 1450
810 LPRINT CHR$(14);"L O N G I T U D"
820 LPRINT CHR$(14);"(+- 0.15 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm)"
830 LPRINT
840 LPRINT
850 LPRINT " ", "LONGITUD", "POROSIDAD", " ERROR"
860 LPRINT " ", " (cm)", " (%)", " (%)"
870 LPRINT " ", "-----", "-----", "-----"
880 LPRINT
890 FOR I=-.15 TO .15 STEP .01
900 LI=L+I
910 VR=(PI*D^2*L)/4
920 POR=FIX(((VR-VS)/VR)*10000)/100
930 ER=FIX(ABS((PORR-POR)/PORR)*100)
940 LPRINT ,LI,POR,ER
950 NEXT I
960 INPUT"DESEAS CONTINUAR IMPRIMIENDO (TECLEA CUALQUIER NUMERO): ";SI
970 GOSUB 1450
980 LPRINT CHR$(14);"INCREMENTO DEL VOLUMEN"
990 LPRINT CHR$(14);"(+- 0.5 CON INCREMENTOS DE 0.05 cm^3)"
1000 LPRINT
1010 LPRINT
1020 LPRINT " ", "INCREMENTO"
1030 LPRINT " ", " DEL"
1040 LPRINT " ", " VOLUMEN", "POROSIDAD", " ERROR"
1050 LPRINT " ", " (cm^3)", " (%)", " (%)"
1060 LPRINT " ", "-----", "-----", "-----"
1070 LPRINT
1080 FOR I=-.5 TO .5 STEP .05
1090 DVI=DV+I
1100 VR=(PI*D^2*L)/4
1110 VCM=DVI/((PA/(M*DVI))-1)
1120 VS=VCV-VCM
1130 POR=FIX(((VR-VS)/VR)*10000)/100
1140 ER=FIX(ABS((PORR-POR)/PORR)*100)
1150 LPRINT ,DVI,POR,ER
1160 NEXT I
1170 INPUT"DESEAS CONTINUAR IMPRIMIENDO (TECLEA CUALQUIER NUMERO): ";SI
1180 GOSUB 1450
1190 LPRINT CHR$(14);"PRESION ATMOSFERICA LOCAL"
1200 LPRINT CHR$(14);"(+- 0.2 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm Hg)"
1210 LPRINT
1220 LPRINT
1230 LPRINT " ", " PRESION"
1240 LPRINT " ", "ATMOSFERICA"
1250 LPRINT " ", " LOCAL", "POROSIDAD", " ERROR"
1260 LPRINT " ", " (cm DE Hg)", " (%)", " (%)"
1270 LPRINT " ", "-----", "-----", "-----"
1280 LPRINT
1290 FOR I=-.2 TO .2 STEP .01
1300 DVI=DVI+I

```

```
1310 VCM=DV/((PAI/(M*DV))-1)
1320 VS=VCM-VCM
1330 POR=FIX(((VR-VS)/VR)*10000)/100
1340 ER=FIX(ABS((PORR-POR)/PORR)*100)
1350 LPRINT ,PAI,POR,ER
1360 NEXT I
1370 INPUT"DESEAS DAR OTRO VALOR DE POROSIDAD: SI(1) O NO(2) = ";N
1380 INPUT"DESEAS CONTINUAR IMPRIMIENDO (TECLEA CUALQUIER NUMERO): ";SI
1390 IF N=1 THEN 540
1400 PRINT
1410 INPUT"DESEAS DAR OTROS VALORES DE MUESTRA: SI(1) O NO(2) = ";N
1420 INPUT"DESEAS CONTINUAR IMPRIMIENDO (TECLEA CUALQUIER NUMERO): ";SI
1430 IF N=1 THEN 510
1440 END
1450 LPRINT CHR$(14);"M U E S T R A # ";NM
1460 LPRINT
1470 LPRINT"DIAMETRO (cm) = ";D
1480 LPRINT"LONGITUD (cm) = ";L
1490 LPRINT
1500 LPRINT
1510 LPRINT CHR$(14);"VALOR DE LA POROSIDAD (%) = ";PORR
1520 LPRINT
1530 LPRINT"VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm^3) = ";DV
1540 LPRINT
1550 LPRINT
1560 LPRINT CHR$(14);"PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE : "
1570 LPRINT
1580 LPRINT
1590 RETURN
```

VII.4 RESULTADOS DE LA CORRIDA DEL PROGRAMA

Los resultados obtenidos de la corrida del programa se presentan a continuación agrupados en la siguiente forma:

A) RESULTADOS QUE ARROJA EL PROGRAMA

En los resultados que arroja el programa se muestran las porosidades obtenidas (en por ciento) y los errores cometidos (en por ciento con respecto al valor real) de acuerdo a la variación de los valores de los distintos parámetros considerados. Solo se presentan los resultados para las porosidades de 1, 10 y 30 % de ambas muestras, aunque se hizo la corrida para las porosidades de 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 25 y 30 % para las dos muestras y estos resultados se utilizaron para elaborar las Tablas y Gráficas de los incisos B a E siguientes.

B) RESUMEN DE LAS POROSIDADES OBTENIDAS (TABLAS Y GRAFICAS)

Resúmenes de las porosidades obtenidas al variar los cuatro parámetros considerados en el estudio y sus gráficas correspondientes para ambas muestras. Se presentan los datos para porosidades de 1, 5, 10, 15, 20 y 30 %.

C) CUADROS COMPARATIVOS DE LOS ERRORES (TABLAS Y GRAFICAS)

Cuadros comparativos de los errores en la porosidad debidos a las variaciones en las mediciones al tomar las lecturas de los cuatro parámetros, para ambas muestras. Se consideraron 5 diferentes valores para cada parámetro: el valor real, el máximo y el mínimo valor del incremento y un valor intermedio tanto para cuando se mide en más como cuando se mide en menos. Se presentan datos para porosidades de 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 25 y 30 % en forma tabular y gráfica.

D) CUADROS COMPARATIVOS DE LOS ERRORES COMPARANDO AMBAS MUESTRAS (TABLAS Y GRAFICAS)

Cuadros comparativos entre las dos muestras analizadas en esta tesis de acuerdo al error que se comete al efectuar las mediciones en cada una de ellas, tomando el máximo y el mínimo valor del incremento para cada parámetro. Se presentan datos para porosidades de 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 25 y 30 % para las dos muestras, en forma de tabla y de gráfica.

E) CUADRO COMPARATIVO GLOBAL DE LOS MAXIMOS ERRORES (TABLA Y GRAFICA)

Cuadro comparativo global de los porcentajes de error en la porosidad debidos a los máximos errores cometidos al medir cada parámetro en las dos muestras analizadas.

A) RESULTADOS QUE
ARROJA EL PROGRAMA

U N A M

FACULTAD DE INGENIERIA

OBJETIVO DEL PROGRAMA

CALCULO DE PRUEBAS DE SENSIBILIDAD

EN LA

POROSIDAD EFECTIVA

EN UN

EQUIPO TIPO BOYLE DE BAJA PRESION

REALIZADO POR

VICTOR ENRIQUE ROMERO SILVA

D A T O S G E N E R A L E S :

VALOR DE LA CONSTANTE m DE LA BURETA
1.1417

PRESION ATMOSFERICA LOCAL (cm DE Hg)
58

VOLUMEN DE CELDA VACIA (cm^3)
125.44

M U E S T R A # 1

DIAMETRO (cm) = 2.54

LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 1

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 37.54441

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

D I A M E T R O
(+- 0.15 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm)

DIAMETRO (cm) =====	POROSIDAD (%) =====	ERROR (%) =====
2.39	-11.81	1281
2.4	-10.88	1188
2.41	-9.97	1097
2.42	-9.060001	1006
2.43	-8.16	916
2.44	-7.28	828
2.45	-6.4	740
2.46	-5.54	654
2.47	-4.69	569
2.48	-3.85	485
2.49	-3.01	401
2.5	-2.19	319
2.51	-1.38	238
2.52	-.57	157
2.53	.21	79
2.54	.99	0
2.55	1.77	77
2.56	2.53	153
2.57	3.29	229
2.58	4.04	304
2.59	4.78	378
2.6	5.51	451
2.61	6.23	523
2.62	6.95	595
2.63	7.65	665
2.64	8.350001	735
2.65	9.04	804
2.66	9.72	872
2.67	10.4	939
2.68	11.07	1007
2.69	11.73	1073

M U E S T R A # 1

DIAMETRO (cm) = 2.54

LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 1

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 37.54441

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

L O N G I T U D

(+- 0.15 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm)

LONGITUD (cm) *****	POROSIDAD (%) *****	ERROR (%) *****
3.66	-3.05	405
3.67	-2.77	377
3.68	-2.49	349
3.69	-2.22	322
3.7	-1.94	294
3.71	-1.67	267
3.72	-1.39	238
3.73	-1.12	211
3.74	-.85	185
3.75	-.58	158
3.76	-.31	131
3.77	-.05	104
3.78	.21	79
3.79	.47	52
3.8	.73	26
3.81	.99	0
3.82	1.25	25
3.83	1.51	51
3.84	1.77	77
3.85	2.02	102
3.86	2.28	128
3.87	2.53	153
3.88	2.78	178
3.89	3.03	203
3.9	3.28	228
3.91	3.53	253
3.92	3.77	277
3.93	4.02	302
3.94	4.26	326
3.95	4.5	350
3.96	4.74	375

M U E S T R A * 1

DIAMETRO (cm) = 2.54

LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 1

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 37.54441

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

INCREMENTO DEL VOLUMEN
(+ - 0.5 CON INCREMENTOS DE 0.05 cm³)

INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm ³)	POROSIDAD (%)	ERROR (%)
=====	=====	=====
37.04441	-33.06	3406
37.09441	-29.77	3077
37.14441	-26.46	2746
37.19441	-23.12	2412
37.24441	-19.76	2076
37.29441	-16.37	1737
37.34441	-12.95	1395
37.39441	-9.5	1050
37.44441	-6.03	703
37.49441	-2.53	353
37.54441	.99	0
37.59441	4.55	355
37.64441	8.140001	714
37.69441	11.76	1076
37.74441	15.4	1440
37.79441	19.08	1808
37.84441	22.79	2179
37.89441	26.52	2552
37.94441	30.29	2929
37.99441	34.09	3309

M U E S T R A # 1

DIAMETRO (cm) = 2.54
LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 1

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 37.54441

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

PRESION ATMOSFERICA LOCAL
(+- 0.2 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm Hg)

PRESION ATMOSFERICA LOCAL (cm DE Hg)	POROSIDAD (%)	ERROR (%)
*****	*****	*****
57.8	8.37	737
57.81	8	700
57.82	7.62	662
57.83	7.25	625
57.84	6.88	588
57.85	6.51	551
57.86	6.14	514
57.87	5.76	476
57.88	5.39	439
57.89	5.03	403
57.9	4.66	366
57.91	4.29	329
57.92	3.92	292
57.93	3.55	255
57.94	3.19	219
57.95	2.82	182
57.96	2.45	145
57.97	2.09	108
57.98	1.72	72
57.99	1.36	36
58	.99	0
58.01	.63	37
58.02	.27	73
58.03	-9.000001E-02	109
58.04	-.45	145
58.05	-.81	181
58.06	-1.17	217
58.07	-1.53	253
58.08	-1.89	289
58.09	-2.25	325
58.1	-2.61	361
58.11	-2.97	397
58.12	-3.33	433
58.13	-3.69	469
58.14	-4.04	504
58.15	-4.4	540
58.16	-4.76	576
58.17	-5.11	611
58.18	-5.47	647
58.19	-5.82	682

MUESTRA # 1

DIAMETRO (cm) = 2.54

LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 10

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 37.67008

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

D I A M E T R O
(+- 0.15 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm)

DIAMETRO (cm)	POROSIDAD (%)	ERROR (%)
*****	*****	*****
2.39	-1.65	116
2.4	-.8	108
2.41	.02	99
2.42	.85	91
2.43	1.66	83
2.44	2.46	75
2.45	3.26	67
2.46	4.04	59
2.47	4.82	51
2.48	5.59	44
2.49	6.34	36
2.5	7.09	29
2.51	7.83	21
2.52	8.560001	14
2.53	9.28	7
2.54	9.99	0
2.55	10.7	6
2.56	11.39	13
2.57	12.08	20
2.58	12.76	27
2.59	13.43	34
2.6	14.1	41
2.61	14.76	47
2.62	15.41	54
2.63	16.05	60
2.64	16.68	66
2.65	17.31	73
2.66	17.93	79
2.67	18.54	85
2.68	19.15	91
2.69	19.75	97

MUESTRA # 1

DIAMETRO (cm) = 2.54

LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 10

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 37.67008

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

LONGITUD
(+- 0.15 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm)

LONGITUD (cm) =====	POROSIDAD (%) =====	ERROR (%) =====
3.66	6.3	36
3.67	6.56	34
3.68	6.81	31
3.69	7.07	29
3.7	7.32	26
3.71	7.57	24
3.72	7.82	21
3.73	8.060001	19
3.74	8.310001	16
3.75	8.55	14
3.76	8.8	11
3.77	9.04	9
3.78	9.28	7
3.79	9.520001	4
3.8	9.76	2
3.81	9.99	0
3.82	10.23	2
3.83	10.46	4
3.84	10.7	6
3.85	10.93	9
3.86	11.16	11
3.87	11.39	13
3.88	11.62	16
3.89	11.84	18
3.9	12.07	20
3.91	12.29	22
3.92	12.52	25
3.93	12.74	27
3.94	12.96	29
3.95	13.18	31
3.96	13.4	33

M U E S T R A # 1

DIAMETRO (cm) = 2.54

LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 10

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 37.67008

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

INCREMENTO DEL VOLUMEN
(+- 0.5 CON INCREMENTOS DE 0.05 cm³)

INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm ³)	POROSIDAD (%)	ERROR (%)
*****	*****	*****
37.17008	-24.75	347
37.22007	-21.4	314
37.27007	-18.02	280
37.32008	-14.61	246
37.37008	-11.18	211
37.42008	-7.72	177
37.47007	-4.23	142
37.52007	-0.72	107
37.57008	2.82	71
37.62008	6.39	36
37.67008	9.99	0
37.72007	13.62	36
37.77007	17.29	72
37.82008	20.98	109
37.87008	24.7	147
37.92008	28.46	184
37.97007	32.24	222
38.02007	36.06	260
38.07008	39.91	299
38.12008	43.72	337

M U E S T R A # 1

DIAMETRO (cm) = 2.54

LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 10

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 37.67008

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

PRESION ATMOSFERICA LOCAL
(± 0.2 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm Hg

PRESION ATMOSFERICA LOCAL (cm DE Hg)	POROSIDAD (%)	ERROR (%)
*****	*****	*****
57.8	17.56	75
57.81	17.18	71
57.82	16.8	67
57.83	16.41	64
57.84	16.03	60
57.85	15.65	56
57.86	15.27	52
57.87	14.89	48
57.88	14.51	45
57.89	14.13	41
57.9	13.75	37
57.91	13.37	33
57.92	13	30
57.93	12.62	26
57.94	12.24	22
57.95	11.87	18
57.96	11.49	14
57.97	11.12	11
57.98	10.74	7
57.99	10.37	3
58	9.99	0
58.01	9.62	3
58.02	9.25	7
58.03	8.87	11
58.04	8.5	15
58.05	8.13	18
58.06	7.76	22
58.07	7.39	26
58.08	7.02	29
58.09	6.65	33
58.1	6.28	37
58.11	5.92	40
58.12	5.55	44
58.13	5.18	48
58.14	4.81	51
58.15	4.45	55
58.16	4.08	59
58.17	3.72	62
58.18	3.35	66
58.19	2.99	70

M U E S T R A # 1

DIAMETRO (cm) = 2.54
 LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 30

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 37.94046

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

D I A M E T R O
 (+- 0.15 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm)

DIAMETRO (cm)	POROSIDAD (%)	ERROR (%)
*****	*****	*****
2.39	20.93	30
2.4	21.59	28
2.41	22.24	25
2.42	22.88	23
2.43	23.51	21
2.44	24.14	19
2.45	24.76	17
2.46	25.37	15
2.47	25.97	13
2.48	26.57	11
2.49	27.16	9
2.5	27.74	7
2.51	28.31	5
2.52	28.88	3
2.53	29.44	1
2.54	29.99	0
2.55	30.54	1
2.56	31.08	3
2.57	31.62	5
2.58	32.15	7
2.59	32.67	8
2.6	33.19	10
2.61	33.7	12
2.62	34.2	14
2.63	34.7	15
2.64	35.2	17
2.65	35.69	18
2.66	36.17	20
2.67	36.65	22
2.68	37.12	23
2.69	37.58	25

M U E S T R A # 1

DIAMETRO (cm) = 2.54

LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 30

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 37.94046

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

L O N G I T U D
(+- 0.15 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm)

LONGITUD (cm) *****	POROSIDAD (%) *****	ERROR (%) *****
3.66	27.13	9
3.67	27.32	8
3.68	27.52	8
3.69	27.72	7
3.7	27.91	6
3.71	28.11	6
3.72	28.3	5
3.73	28.49	5
3.74	28.68	4
3.75	28.87	3
3.76	29.06	3
3.77	29.25	2
3.78	29.44	1
3.79	29.63	1
3.8	29.81	0
3.81	29.99	0
3.82	30.18	0
3.83	30.36	1
3.84	30.54	1
3.85	30.72	2
3.86	30.9	2
3.87	31.08	3
3.88	31.26	4
3.89	31.43	4
3.9	31.61	5
3.91	31.79	5
3.92	31.96	6
3.93	32.13	7
3.94	32.3	7
3.95	32.48	8
3.96	32.65	8

M U E S T R A # 1

DIAMETRO (cm) = 2.54

LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 30

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 37.94046

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

INCREMENTO DEL VOLUMEN
(+- 0.5 CON INCREMENTOS DE 0.05 cm³)

INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm ³) =====	POROSIDAD (%) =====	ERROR (%) =====
37.44046	-6.3	120
37.49046	-2.8	109
37.54046	.71	97
37.59046	4.27	85
37.64046	7.86	73
37.69046	11.47	61
37.74046	15.11	49
37.79046	18.79	37
37.84046	22.49	25
37.89046	26.23	12
37.94046	29.99	0
37.99046	33.79	12
38.04046	37.62	25
38.09046	41.48	38
38.14046	45.38	51
38.19046	49.31	64
38.24046	53.27	77
38.29046	57.26	90
38.34046	61.29	104
38.39046	65.35	117

M U E S T R A # 1

DIAMETRO (cm) = 2.54
LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 30

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 37.94046

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

PRESION ATMOSFERICA LOCAL
(+/- 0.2 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm Hg)

PRESION ATMOSFERICA LOCAL (cm DE Hg)	POROSIDAD (%)	ERROR (%)
*****	*****	*****
57.8	38	26
57.81	37.6	25
57.82	37.19	23
57.83	36.79	22
57.84	36.38	21
57.85	35.98	19
57.86	35.58	18
57.87	35.17	17
57.88	34.77	15
57.89	34.37	14
57.9	33.97	13
57.91	33.57	11
57.92	33.17	10
57.93	32.77	9
57.94	32.37	7
57.95	31.98	6
57.96	31.58	5
57.97	31.18	3
57.98	30.79	2
57.99	30.39	1
58	29.99	0
58.01	29.6	1
58.02	29.21	2
58.03	28.81	3
58.04	28.42	5
58.05	28.03	6
58.06	27.64	7
58.07	27.24	9
58.08	26.85	10
58.09	26.46	11
58.1	26.07	13
58.11	25.68	14
58.12	25.3	15
58.13	24.91	16
58.14	24.52	18
58.15	24.13	19
58.16	23.75	20
58.17	23.36	22
58.18	22.97	23
58.19	22.59	24

M U E S T R A # 2

DIAMETRO (cm) = 3.81

LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 1

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 35.5075

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

D I A M E T R O
(+- 0.15 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm)

DIAMETRO (cm)	POROSIDAD (%)	ERROR (%)
=====	=====	=====
3.66	-7.28	828
3.67	-6.69	769
3.68	-6.11	711
3.69	-5.54	654
3.7	-4.97	597
3.71	-4.4	540
3.72	-3.84	484
3.73	-3.29	429
3.74	-2.74	374
3.75	-2.19	319
3.76	-1.65	265
3.77	-1.11	211
3.78	-.57	157
3.79	-.04	104
3.8	.47	52
3.81	.99	0
3.82	1.51	51
3.83	2.03	103
3.84	2.54	154
3.85	3.04	204
3.86	3.54	254
3.87	4.04	304
3.88	4.53	353
3.89	5.02	402
3.9	5.51	451
3.91	5.99	498
3.92	6.47	547
3.93	6.95	595
3.94	7.42	642
3.95	7.89	689
3.96	8.350001	735

M U E S T R A # 2

DIAMETRO (cm) = 3.81

LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = .1

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 35.5075

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

L O N G I T U D
(+- 0.15 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm)

LONGITUD (cm) *****	POROSIDAD (%) *****	ERROR (%) *****
3.66	-3.05	405
3.67	-2.77	377
3.68	-2.49	349
3.69	-2.21	321
3.7	-1.94	294
3.71	-1.66	266
3.72	-1.39	238
3.73	-1.12	211
3.74	-.85	185
3.75	-.58	158
3.76	-.31	131
3.77	-.05	104
3.78	.21	79
3.79	.47	52
3.8	.73	26
3.81	.99	0
3.82	1.25	25
3.83	1.51	51
3.84	1.77	77
3.85	2.02	102
3.86	2.28	128
3.87	2.53	153
3.88	2.78	178
3.89	3.03	203
3.9	3.28	228
3.91	3.53	253
3.92	3.77	277
3.93	4.02	302
3.94	4.26	326
3.95	4.5	350
3.96	4.74	373

M U E S T R A # 2

DIAMETRO (cm) = 3.81

LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 1

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 35.5075

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

INCREMENTO DEL VOLUMEN
(+/- 0.5 CON INCREMENTOS DE 0.05 cm³)

INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm ³)	FOROSIDAD (%)	ERROR (%)
*****	*****	*****
35.0075	-10.14	1114
35.0575	-9.060001	1006
35.1075	-7.98	897
35.1575	-6.88	788
35.2075	-5.78	678
35.2575	-4.67	567
35.3075	-3.55	455
35.3575	-2.42	342
35.4075	-1.29	229
35.4575	-.15	115
35.5075	.99	0
35.5575	2.15	115
35.6075	3.32	232
35.6575	4.5	350
35.7075	5.68	467
35.7575	6.87	587
35.8075	8.08	708
35.8575	9.29	829
35.9075	10.51	951
35.9575	11.74	1074

M U E S T R A # 2

DIAMETRO (cm) = 3.81

LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 1

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 35.5075

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

PRESION ATMOSFERICA LOCAL
(\pm 0.2 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm Hg)

PRESION ATMOSFERICA LOCAL (cm DE Hg) =====	POROSIDAD (%) =====	ERROR (%) =====
57.8	3.19	219
57.81	3.08	208
57.82	2.97	197
57.83	2.86	185
57.84	2.73	175
57.85	2.64	164
57.86	2.53	153
57.87	2.42	142
57.88	2.31	131
57.89	2.2	120
57.9	2.09	108
57.91	1.98	98
57.92	1.87	87
57.93	1.76	76
57.94	1.65	65
57.95	1.54	53
57.96	1.43	42
57.97	1.32	32
57.98	1.21	21
57.99	1.1	10
58	.99	0
58.01	.89	11
58.02	.78	22
58.03	.67	33
58.04	.56	44
58.05	.45	55
58.06	.34	66
58.07	.24	76
58.08	.13	87
58.09	.02	98
58.1	-.08	108
58.11	-.18	118
58.12	-.29	129
58.13	-.4	140
58.14	-.5	150
58.15	-.61	161
58.16	-.72	172
58.17	-.83	183
58.18	-.93	193
58.19	-1.04	204

M U E S T R A # 2

DIAMETRO (cm) = 3.81
 LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 10

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 35.88655

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

D I A M E T R O
 (+- 0.15 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm)

DIAMETRO (cm)	POROSIDAD (%)	ERROR (%)
-----	-----	-----
3.66	2.47	75
3.67	3	70
3.68	3.52	64
3.69	4.05	59
3.7	4.56	54
3.71	5.08	49
3.72	5.59	44
3.73	6.09	39
3.74	6.59	34
3.75	7.09	29
3.76	7.59	24
3.77	8.08	19
3.78	8.560001	14
3.79	9.04	9
3.8	9.520001	4
3.81	10	0
3.82	10.47	4
3.83	10.93	9
3.84	11.4	13
3.85	11.86	18
3.86	12.31	23
3.87	12.76	27
3.88	13.21	32
3.89	13.66	36
3.9	14.1	41
3.91	14.54	45
3.92	14.98	49
3.93	15.41	54
3.94	15.84	58
3.95	16.26	62
3.96	16.68	66

M U E S T R A # 2

DIAMETRO (cm) = 3.81

LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 10

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 35.88655

FRECUENCIAS EN LAS MEDICIONES DE :

L O N G I T U D

(+- 0.15 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm)

LONGITUD (cm) *****	POROSIDAD (%) *****	ERROR (%) *****
3.66	6.31	36
3.67	6.56	34
3.68	6.82	31
3.69	7.07	29
3.7	7.32	26
3.71	7.57	24
3.72	7.82	21
3.73	8.060001	19
3.74	8.310001	16
3.75	8.560001	14
3.76	8.8	11
3.77	9.04	9
3.78	9.28	7
3.79	9.520001	4
3.8	9.76	2
3.81	10	0
3.82	10.23	2
3.83	10.46	4
3.84	10.7	6
3.85	10.93	9
3.86	11.16	11
3.87	11.39	13
3.88	11.62	16
3.89	11.85	18
3.9	12.07	20
3.91	12.3	23
3.92	12.52	25
3.93	12.74	27
3.94	12.96	29
3.95	13.18	31
3.96	13.4	33

M U E S T R A # 2

DIAMETRO (cm) = 3.81

LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 10

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 35.88655

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

INCREMENTO DEL VOLUMEN
(± 0.5 CON INCREMENTOS DE 0.05 cm³)

INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm ³)	POROSIDAD (%)	ERROR (%)
*****	*****	*****
35.38655	-1.76	117
35.43655	-.63	106
35.48655	.51	94
35.53655	1.67	83
35.58655	2.83	71
35.63655	4	60
35.68655	5.18	48
35.73655	6.37	36
35.78655	7.57	24
35.83655	8.78	12
35.88655	10	0
35.93655	11.22	12
35.98655	12.45	24
36.03655	13.7	36
36.08655	14.95	49
36.13655	16.21	62
36.18655	17.48	74
36.23655	18.76	87
36.28655	20.05	100
36.33655	21.35	113

M U E S T R A # 2

DIAMETRO (cm) = 3.81

LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 10

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 35.88655

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

PRESION ATMOSFERICA LOCAL
(+- 0.2 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm Hg)

PRESION ATMOSFERICA LOCAL (cm DE Hg)	POROSIDAD (%)	ERROR (%)
=====	=====	=====
57.8	12.36	23
57.81	12.24	22
57.82	12.12	21
57.83	12	20
57.84	11.88	18
57.85	11.76	17
57.86	11.64	16
57.87	11.52	15
57.88	11.41	14
57.89	11.29	12
57.9	11.17	11
57.91	11.05	10
57.92	10.93	9
57.93	10.82	8
57.94	10.7	6
57.95	10.58	5
57.96	10.46	4
57.97	10.35	3
57.98	10.23	2
57.99	10.11	1
58	10	0
58.01	9.88	1
58.02	9.76	2
58.03	9.649999	3
58.04	9.53	4
58.05	9.41	5
58.06	9.3	6
58.07	9.18	8
58.08	9.07	9
58.09	8.95	10
58.1	8.83	11
58.11	8.72	12
58.12	8.600001	13
58.13	8.49	15
58.14	8.37	16
58.15	8.26	17
58.16	8.140001	18
58.17	8.03	19
58.18	7.92	20
58.19	7.8	21

M U E S T R A # 2

DIAMETRO (cm) = 3.81
LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 30

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 36.65975

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

D I A M E T R O
(+ - 0.15 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm)

DIAMETRO (cm)	POROSIDAD (%)	ERROR (%)
=====	=====	=====
3.66	24.14	19
3.67	24.55	18
3.68	24.96	16
3.69	25.37	15
3.7	25.77	14
3.71	26.17	12
3.72	26.57	11
3.73	26.96	10
3.74	27.35	8
3.75	27.74	7
3.76	28.12	6
3.77	28.5	5
3.78	28.88	3
3.79	29.25	2
3.8	29.63	1
3.81	29.99	0
3.82	30.36	1
3.83	30.72	2
3.84	31.08	3
3.85	31.44	4
3.86	31.8	5
3.87	32.15	7
3.88	32.5	8
3.89	32.84	9
3.9	33.19	10
3.91	33.53	11
3.92	33.87	12
3.93	34.2	14
3.94	34.54	15
3.95	34.87	16
3.96	35.2	17

M U E S T R A # 2

DIAMETRO (cm) = 3.81

LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 30

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 36.65975

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

L O N G I T U D
(+- 0.15 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm)

LONGITUD (cm) *****	POROSIDAD (%) *****	ERROR (%) *****
3.66	27.13	9
3.67	27.32	8
3.68	27.52	8
3.69	27.72	7
3.7	27.91	6
3.71	28.11	6
3.72	28.3	5
3.73	28.49	5
3.74	28.68	4
3.75	28.87	3
3.76	29.06	3
3.77	29.25	2
3.78	29.44	1
3.79	29.63	1
3.8	29.81	0
3.81	29.99	0
3.82	30.18	0
3.83	30.36	1
3.84	30.54	1
3.85	30.72	2
3.86	30.9	2
3.87	31.08	3
3.88	31.26	4
3.89	31.43	4
3.9	31.61	5
3.91	31.79	5
3.92	31.96	6
3.93	32.13	7
3.94	32.3	7
3.95	32.48	8
3.96	32.65	8

M U E S T R A # 2

DIAMETRO (cm) = 3.81

LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 30

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 36.65975

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

INCREMENTO DEL VOLUMEN
(+/- 0.5 CON INCREMENTOS DE 0.05 cm³)

INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm ³)	POROSIDAD (%)	ERROR (%)
*****	*****	*****
36.15975	16.8	44
36.20974	18.07	39
36.25974	19.36	35
36.30975	20.65	31
36.35975	21.96	26
36.40975	23.27	22
36.45974	24.6	18
36.50974	25.93	13
36.55975	27.28	9
36.60975	28.63	4
36.65975	29.99	0
36.70974	31.37	4
36.75974	32.76	9
36.80975	34.15	13
36.85975	35.56	18
36.90975	36.98	23
36.95974	38.41	28
37.00974	39.85	32
37.05975	41.3	37
37.10975	42.77	42

M U E S T R A # 2

DIAMETRO (cm) = 3.81

LONGITUD (cm) = 3.81

VALOR DE LA POROSIDAD (%) = 30

VALOR DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm³) = 36.65975

PRECISIONES EN LAS MEDICIONES DE :

PRESION ATMOSFERICA LOCAL
(+ - 0.2 CON INCREMENTOS DE 0.01 cm Hg)

PRESION ATMOSFERICA LOCAL (cm DE Hg)	POROSIDAD (%)	ERROR (%)
*****	*****	*****
57.8	32.74	9
57.81	32.6	8
57.82	32.46	8
57.83	32.32	7
57.84	32.18	7
57.85	32.05	6
57.86	31.91	6
57.87	31.77	5
57.88	31.63	5
57.89	31.5	5
57.9	31.36	4
57.91	31.22	4
57.92	31.08	3
57.93	30.95	3
57.94	30.81	2
57.95	30.67	2
57.96	30.54	1
57.97	30.4	1
57.98	30.27	0
57.99	30.13	0
58	29.99	0
58.01	29.86	0
58.02	29.72	0
58.03	29.59	1
58.04	29.45	1
58.05	29.32	2
58.06	29.18	2
58.07	29.05	3
58.08	28.92	3
58.09	28.78	4
58.1	28.65	4
58.11	28.51	4
58.12	28.38	5
58.13	28.25	5
58.14	28.11	6
58.15	27.98	6
58.16	27.85	7
58.17	27.72	7
58.18	27.58	8
58.19	27.45	8

**B) RESUMEN DE LAS POROSIDADES
OBTENIDAS (TABLAS Y GRAFICAS)**

T A B L A 0 1

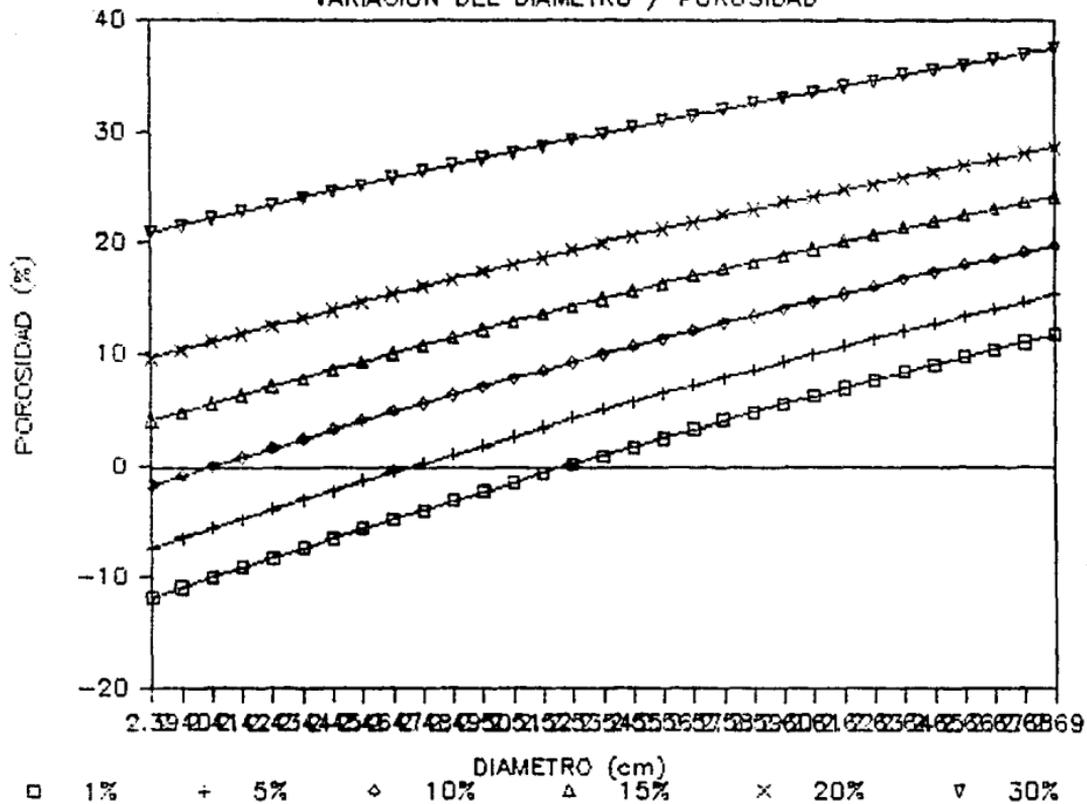
TABLA DE LA MUESTRA 01

VARIACION DEL DIAMETRO \ POROSIDAD

DIAMETRO (cm)	POROSIDAD (1%)	POROSIDAD (5%)	POROSIDAD (10%)	POROSIDAD (15%)	POROSIDAD (20%)	POROSIDAD (30%)
2.39	-11.82	-7.30	-1.65	4.00	9.64	20.94
2.40	-10.89	-6.41	-0.81	4.79	10.39	21.60
2.41	-9.97	-5.53	0.03	5.58	11.14	22.24
2.42	-9.06	-4.66	0.85	6.36	11.87	22.89
2.43	-8.17	-3.80	1.67	7.13	12.59	23.52
2.44	-7.28	-2.94	2.47	7.89	13.31	24.14
2.45	-6.41	-2.11	3.27	8.64	14.01	24.76
2.46	-5.54	-1.27	4.05	9.38	14.71	25.37
2.47	-4.69	-0.44	4.83	10.11	15.40	25.98
2.48	-3.85	0.35	5.59	10.84	16.08	26.57
2.49	-3.02	1.15	6.35	11.55	16.75	27.16
2.50	-2.19	1.94	7.10	12.25	17.42	27.74
2.51	-1.38	2.72	7.84	12.96	18.08	28.32
2.52	-0.58	3.49	8.57	13.65	18.73	28.88
2.53	0.22	4.25	9.29	14.33	19.37	29.45
2.54	1.00	5.00	10.00	15.00	20.00	30.00
2.55	1.77	5.74	10.70	15.67	20.63	30.55
2.56	2.54	6.48	11.40	16.32	21.25	31.09
2.57	3.30	7.20	12.09	16.97	21.86	31.62
2.58	4.05	7.92	12.77	17.62	22.46	32.15
2.59	4.79	8.63	13.44	18.25	23.04	32.68
2.60	5.52	9.33	14.11	18.88	23.65	33.19
2.61	6.26	10.03	14.76	19.50	24.23	33.70
2.62	6.95	10.71	15.41	20.11	24.82	34.21
2.63	7.64	11.39	16.05	20.72	25.38	34.71
2.64	8.34	12.06	16.69	21.32	25.95	35.20
2.65	9.05	12.72	17.32	21.91	26.50	35.69
2.66	9.73	13.38	17.99	22.50	27.04	36.17
2.67	10.41	14.03	18.58	23.08	27.60	36.65
2.68	11.07	14.67	19.16	23.65	28.14	37.12
2.69	11.73	15.30	19.76	24.22	28.67	37.59

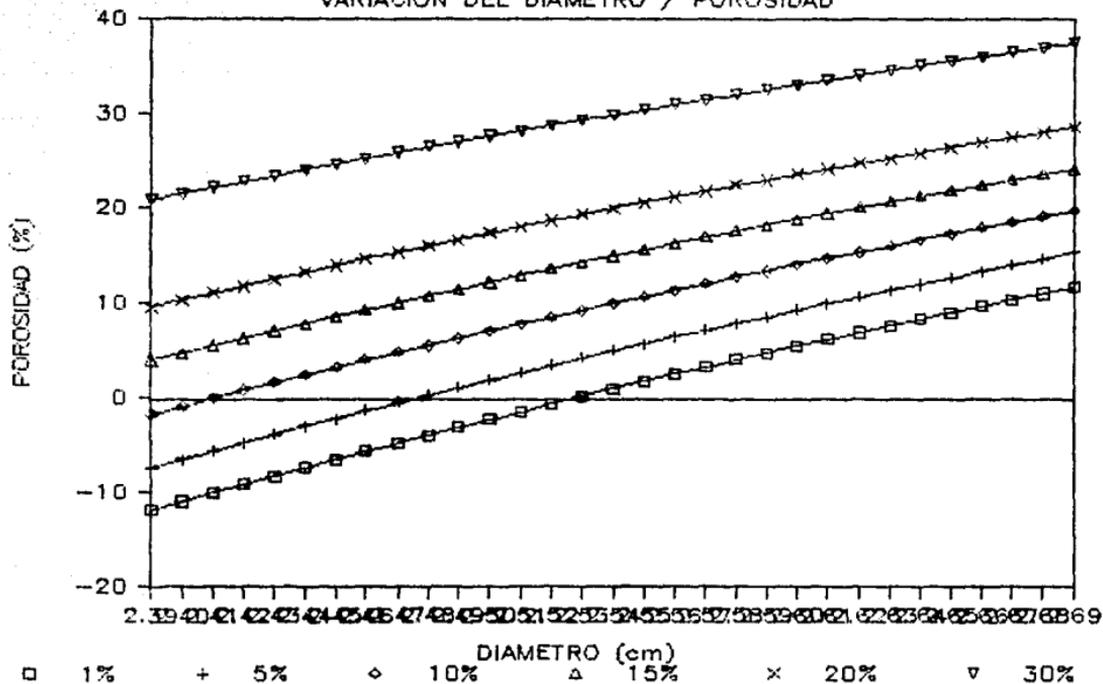
GRAFICA # 1

VARIACION DEL DIAMETRO / POROSIDAD



GRAFICA # 1

VARIACION DEL DIAMETRO / POROSIDAD



T A B L A 0 2

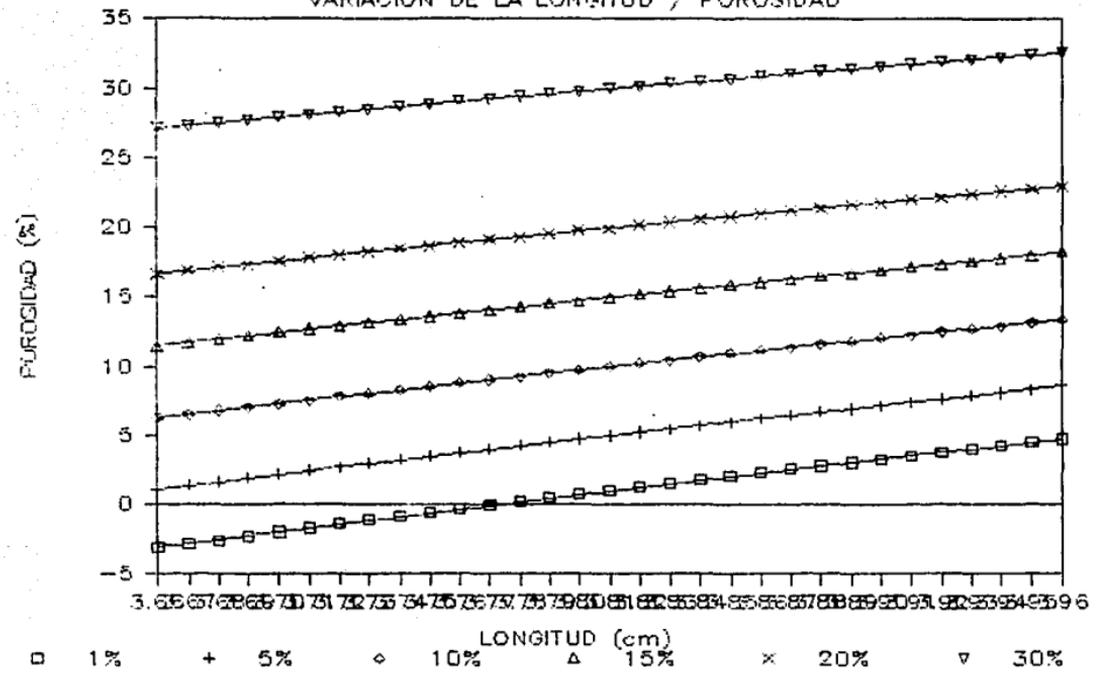
TABLA DE LA MUESTRA 01

VARIACION DE LA LONGITUD \ POROSIDAD

LONGITUD (cm)	POROSIDAD (1%)	POROSIDAD (5%)	POROSIDAD (10%)	POROSIDAD (15%)	POROSIDAD (20%)	POROSIDAD (30%)
3.66	-3.05	1.10	6.30	11.51	16.71	27.13
3.67	-2.77	1.37	6.56	11.75	16.94	27.32
3.68	-2.49	1.64	6.81	11.99	17.17	27.52
3.69	-2.22	1.91	7.07	12.23	17.39	27.72
3.70	-1.94	2.17	7.32	12.47	17.61	27.91
3.71	-1.67	2.43	7.57	12.70	17.84	28.11
3.72	-1.39	2.70	7.82	12.94	18.06	28.30
3.73	-1.12	2.96	8.06	13.17	18.28	28.49
3.74	-0.85	3.22	8.31	13.40	18.49	28.68
3.75	-0.58	3.47	8.55	13.63	18.71	28.87
3.76	-0.31	3.73	8.80	13.86	18.93	29.06
3.77	-0.05	3.99	9.04	14.09	19.14	29.25
3.78	0.21	4.24	9.28	14.32	19.36	29.44
3.79	0.47	4.49	9.52	14.55	19.57	29.63
3.80	0.73	4.74	9.76	14.77	19.78	29.81
3.81	1.00	5.00	10.00	15.00	20.00	30.00
3.82	1.25	5.24	10.23	15.22	20.20	30.18
3.83	1.51	5.49	10.46	15.44	20.41	30.36
3.84	1.77	5.74	10.70	15.66	20.62	30.54
3.85	2.02	5.98	10.93	15.88	20.82	30.72
3.86	2.28	6.23	11.16	16.09	21.03	30.90
3.87	2.53	6.47	11.39	16.31	21.23	31.08
3.88	2.78	6.71	11.62	16.53	21.44	31.26
3.89	3.03	6.95	11.84	16.74	21.64	31.43
3.90	3.28	7.19	12.07	16.96	21.84	31.61
3.91	3.53	7.42	12.29	17.17	22.04	31.79
3.92	3.77	7.66	12.52	17.38	22.24	31.96
3.93	4.02	7.90	12.74	17.59	22.43	32.13
3.94	4.26	8.13	12.96	17.80	22.63	32.30
3.95	4.50	8.36	13.18	18.01	22.83	32.48
3.96	4.74	8.59	13.40	18.21	23.02	32.65

GRAFICA # 2

VARIACION DE LA LONGITUD / POROSIDAD



T A B L A # 3

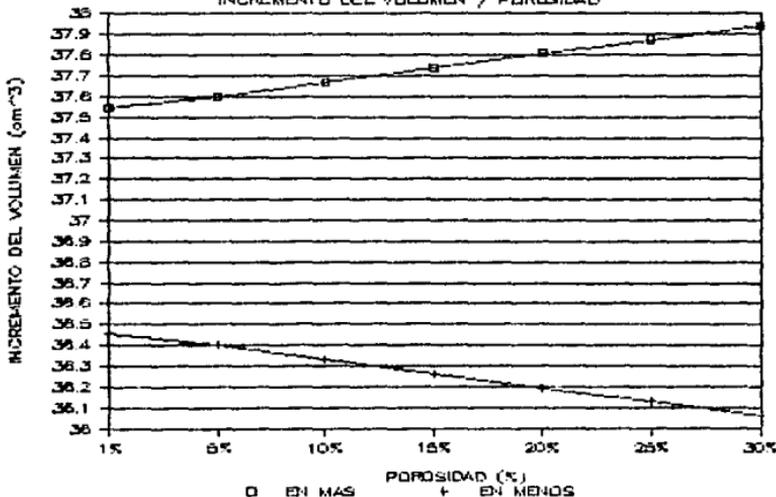
T A B L A D E L A M U E S T R A # 1

VARIACION DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN \ POROSIDAD

POROSIDAD (%) =====	VARIACION DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm ³) (EN MAS) =====	VARIACION DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm ³) (EN MENOS) =====
1%	37.54441	36.45559
5%	37.60060	36.39940
10%	37.67008	36.32992
15%	37.73881	36.26119
20%	37.80675	36.19325
25%	37.87399	36.12601
30%	37.94046	36.05954

GRAFICA # 3

INCREMENTO DEL VOLUMEN / POROSIDAD



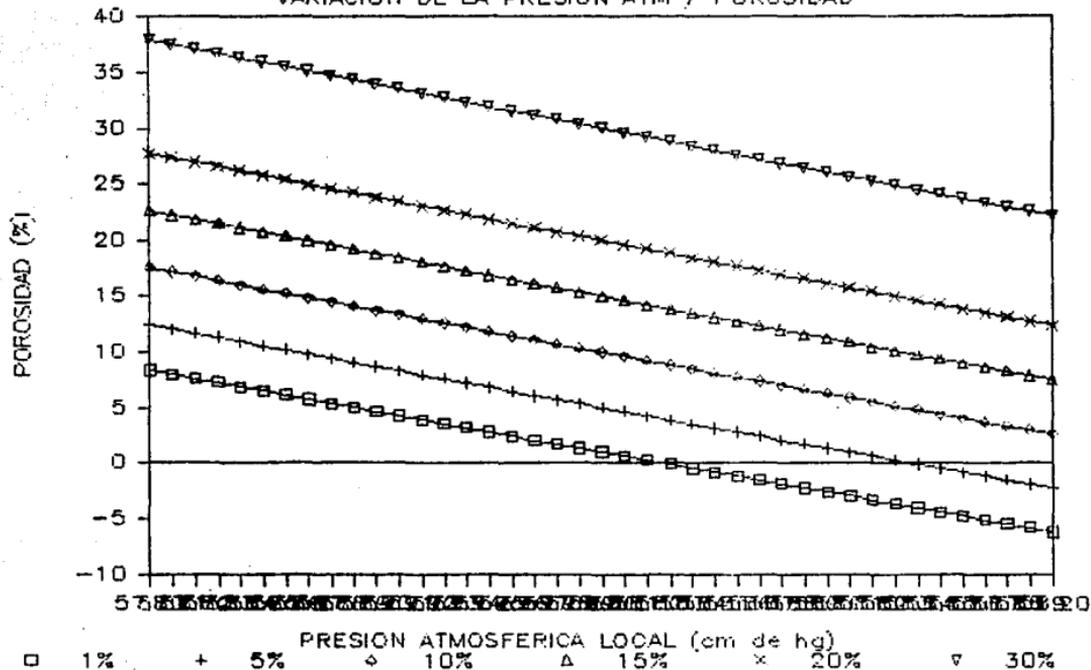
T A B L A 4

T A B L A D E L A M U E S T R A # 1
 V A R I A C I O N D E L A P R E S I O N A T M O S F E R I C A L O C A L \ P O R O S I D A D

PRESION ATMOSFERICA LOCAL (cm de hg)	POROSIDAD (1%)	POROSIDAD (5%)	POROSIDAD (10%)	POROSIDAD (15%)	POROSIDAD (20%)	POROSIDAD (30%)
57.80	8.37	12.46	17.56	22.67	27.78	38.00
57.81	8.00	12.08	17.18	22.28	27.38	37.60
57.82	7.62	11.70	16.80	21.89	26.99	37.19
57.83	7.25	11.32	16.41	21.51	26.60	36.79
57.84	6.88	10.95	16.03	21.12	26.20	36.38
57.85	6.51	10.57	15.65	20.73	25.81	35.98
57.86	6.14	10.20	15.27	20.35	25.42	35.58
57.87	5.76	9.82	14.89	19.96	25.03	35.17
57.88	5.39	9.45	14.51	19.57	24.64	34.77
57.89	5.03	9.07	14.13	19.19	24.25	34.37
57.90	4.66	8.70	13.75	18.81	23.86	33.97
57.91	4.29	8.33	13.37	18.42	23.47	33.57
57.92	3.92	7.96	13.00	18.04	23.08	33.17
57.93	3.55	7.58	12.62	17.66	22.69	32.77
57.94	3.19	7.21	12.24	17.27	22.31	32.37
57.95	2.82	6.84	11.87	16.89	21.92	31.98
57.96	2.45	6.47	11.49	16.51	21.53	31.58
57.97	2.09	6.10	11.12	16.13	21.15	31.18
57.98	1.72	5.73	10.74	15.75	20.76	30.79
57.99	1.36	5.36	10.37	15.37	20.38	30.39
58.00	1.00	5.00	10.00	15.00	20.00	30.00
58.01	0.63	4.63	9.62	14.62	19.61	29.60
58.02	0.27	4.26	9.25	14.24	19.22	29.21
58.03	-0.09	3.89	8.87	13.86	18.84	28.81
58.04	-0.45	3.53	8.50	13.48	18.46	28.42
58.05	-0.81	3.16	8.13	13.11	18.08	28.03
58.06	-1.17	2.80	7.76	12.73	17.70	27.64
58.07	-1.53	2.43	7.39	12.36	17.32	27.24
58.08	-1.89	2.07	7.02	11.98	16.94	26.85
58.09	-2.25	1.70	6.65	11.61	16.56	26.46
58.10	-2.61	1.34	6.28	11.23	16.18	26.07
58.11	-2.97	0.98	5.92	10.86	15.80	25.68
58.12	-3.33	0.61	5.55	10.49	15.42	25.30
58.13	-3.69	0.25	5.18	10.11	15.04	24.91
58.14	-4.04	-0.10	4.81	9.74	14.67	24.52
58.15	-4.40	-0.46	4.45	9.37	14.29	24.13
58.16	-4.76	-0.82	4.08	9.00	13.91	23.75
58.17	-5.11	-1.18	3.72	8.63	13.54	23.36
58.18	-5.47	-1.54	3.35	8.26	13.16	22.97
58.19	-5.82	-1.90	2.99	7.89	12.79	22.59
58.20	-6.18	-2.27	2.63	7.53	12.42	22.21

GRAFICA # 4

VARIACION DE LA PRESION ATM / POROSIDAD



T A B L A 0 5

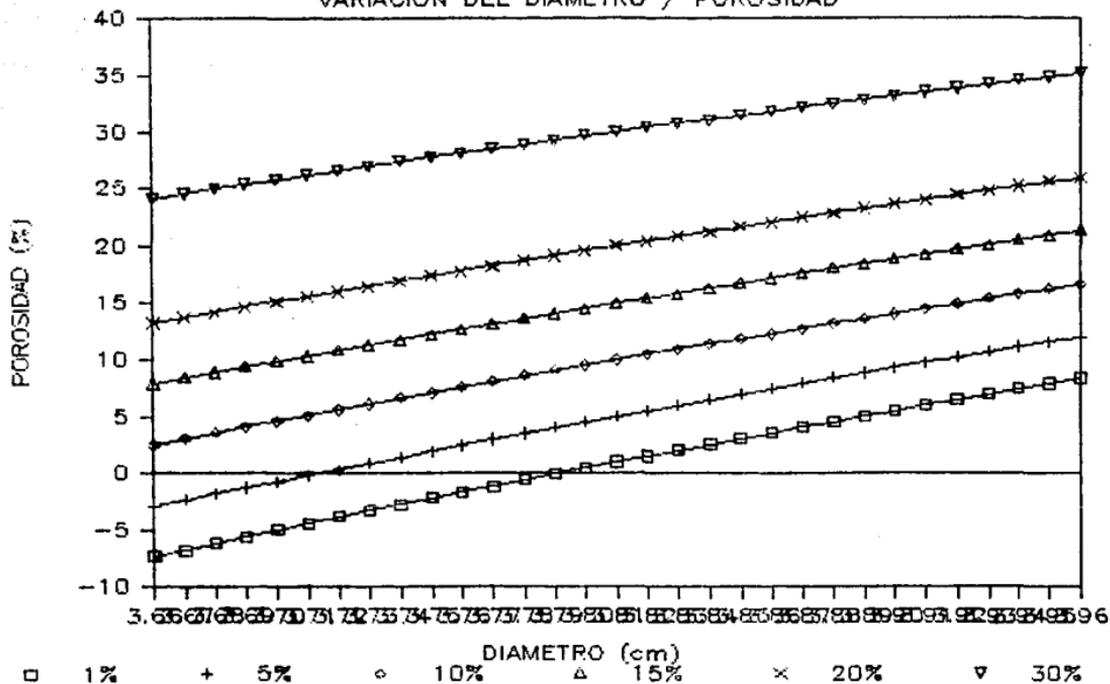
TABLA DE LA MUESTRA 02

VARIACION DEL DIAMETRO \ POROSIDAD

DIAMETRO (cm)	POROSIDAD (1%)	POROSIDAD (5%)	POROSIDAD (10%)	POROSIDAD (15%)	POROSIDAD (20%)	POROSIDAD (30%)
3.66	-7.28	-2.94	2.47	7.88	13.30	24.14
3.67	-6.69	-2.38	3.00	8.39	13.77	24.55
3.68	-6.11	-1.83	3.52	8.88	14.24	24.96
3.69	-5.54	-1.27	4.05	9.38	14.71	25.37
3.70	-4.97	-0.73	4.56	9.87	15.17	25.77
3.71	-4.40	-0.19	5.08	10.35	15.62	26.17
3.72	-3.84	0.34	5.59	10.83	16.08	26.57
3.73	-3.29	0.88	6.09	11.31	16.53	26.96
3.74	-2.74	1.41	6.59	11.78	16.97	27.35
3.75	-2.19	1.93	7.09	12.25	17.41	27.74
3.76	-1.65	2.45	7.59	12.72	17.85	28.12
3.77	-1.11	2.97	8.08	13.18	18.29	28.50
3.78	-0.57	3.48	8.56	13.64	18.72	28.88
3.79	-0.04	3.99	9.04	14.09	19.15	29.25
3.80	0.47	4.49	9.52	14.55	19.57	29.63
3.81	1.00	5.00	10.00	15.00	20.00	30.00
3.82	1.52	5.49	10.47	15.44	20.41	30.36
3.83	2.03	5.98	10.93	15.88	20.83	30.72
3.84	2.54	6.47	11.40	16.32	21.24	31.08
3.85	3.04	6.96	11.86	16.75	21.65	31.44
3.86	3.54	7.44	12.31	17.18	22.05	31.80
3.87	4.04	7.92	12.76	17.61	22.46	32.15
3.88	4.53	8.39	13.21	18.03	22.86	32.50
3.89	5.02	8.87	13.66	18.45	23.25	32.84
3.90	5.51	9.33	14.10	18.87	23.64	33.19
3.91	6.00	9.79	14.54	19.29	24.03	33.53
3.92	6.47	10.25	14.98	19.70	24.42	33.87
3.93	6.95	10.71	15.41	20.11	24.81	34.20
3.94	7.42	11.16	15.84	20.51	25.19	34.54
3.95	7.89	11.61	16.26	20.91	25.57	34.87
3.96	8.36	12.06	16.68	21.31	25.94	35.20

GRAFICA # 5

VARIACION DEL DIAMETRO / POROSIDAD



T A B L A # 6

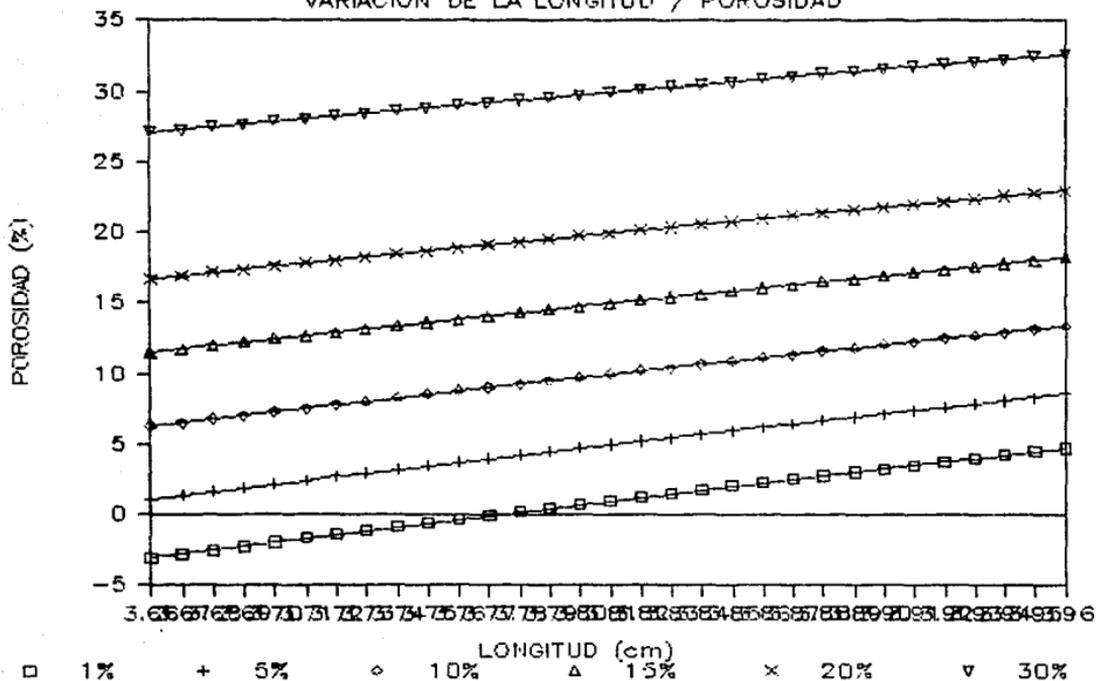
TABLA DE LA MUESTRA # 2

VARIACION DE LA LONGITUD \ POROSIDAD

LONGITUD (ca)	POROSIDAD (1%)	POROSIDAD (5%)	POROSIDAD (10%)	POROSIDAD (15%)	POROSIDAD (20%)	POROSIDAD (30%)
3.66	-3.05	1.10	6.31	11.51	16.72	27.13
3.67	-2.77	1.37	6.56	11.75	16.94	27.32
3.68	-2.49	1.64	6.82	11.99	17.17	27.52
3.69	-2.21	1.91	7.07	12.23	17.39	27.72
3.70	-1.94	2.17	7.32	12.47	17.62	27.91
3.71	-1.66	2.43	7.57	12.70	17.84	28.11
3.72	-1.39	2.70	7.82	12.94	18.06	28.30
3.73	-1.12	2.96	8.06	13.17	18.28	28.49
3.74	-0.85	3.22	8.31	13.40	18.50	28.68
3.75	-0.58	3.47	8.56	13.63	18.71	28.87
3.76	-0.31	3.73	8.80	13.86	18.93	29.06
3.77	-0.05	3.99	9.04	14.09	19.15	29.25
3.78	0.21	4.24	9.28	14.32	19.36	29.44
3.79	0.47	4.49	9.52	14.55	19.57	29.63
3.80	0.73	4.75	9.76	14.77	19.78	29.81
3.81	1.00	5.00	10.00	15.00	20.00	30.00
3.82	1.25	5.24	10.23	15.22	20.20	30.18
3.83	1.51	5.49	10.46	15.44	20.41	30.36
3.84	1.77	5.74	10.70	15.66	20.62	30.54
3.85	2.02	5.99	10.93	15.88	20.83	30.72
3.86	2.28	6.23	11.16	16.10	21.03	30.90
3.87	2.53	6.47	11.39	16.31	21.24	31.08
3.88	2.78	6.71	11.62	16.53	21.44	31.26
3.89	3.03	6.95	11.85	16.74	21.64	31.43
3.90	3.28	7.19	12.07	16.96	21.84	31.61
3.91	3.53	7.42	12.30	17.17	22.04	31.79
3.92	3.77	7.66	12.52	17.38	22.24	31.96
3.93	4.02	7.90	12.74	17.59	22.44	32.13
3.94	4.26	8.13	12.96	17.80	22.63	32.30
3.95	4.50	8.36	13.18	18.01	22.83	32.48
3.96	4.74	8.59	13.40	18.21	23.03	32.65

GRAFICA # 6

VARIACION DE LA LONGITUD / POROSIDAD



T A B L A # 7

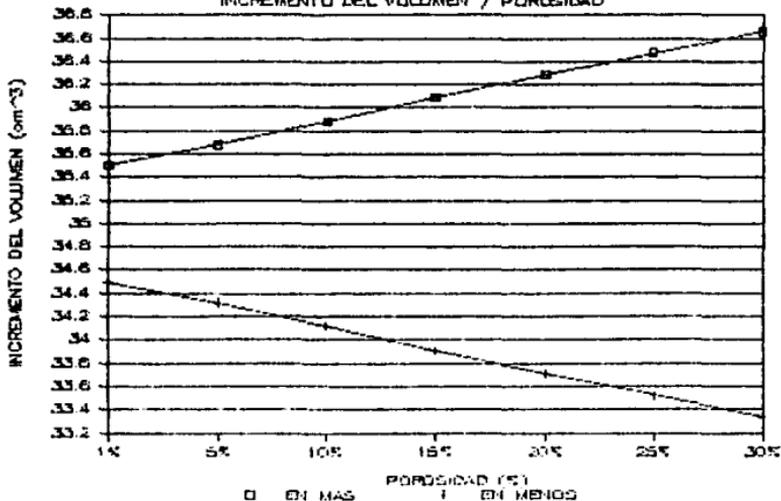
T A B L A D E L A M U E S T R A # 2

VARIACION DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN \ POROSIDAD

POROSIDAD (%)	VARIACION DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN (cm ³)	
	(EN MAS)	(EN MENOS)
1%	35.50750	34.49250
5%	35.67857	34.32143
10%	35.88655	34.11345
15%	36.08836	33.91164
20%	36.28435	33.71565
25%	36.47470	33.52530
30%	36.65975	33.34025

GRAFICA # 7

INCREMENTO DEL VOLUMEN / POROSIDAD



T A B L A # 8

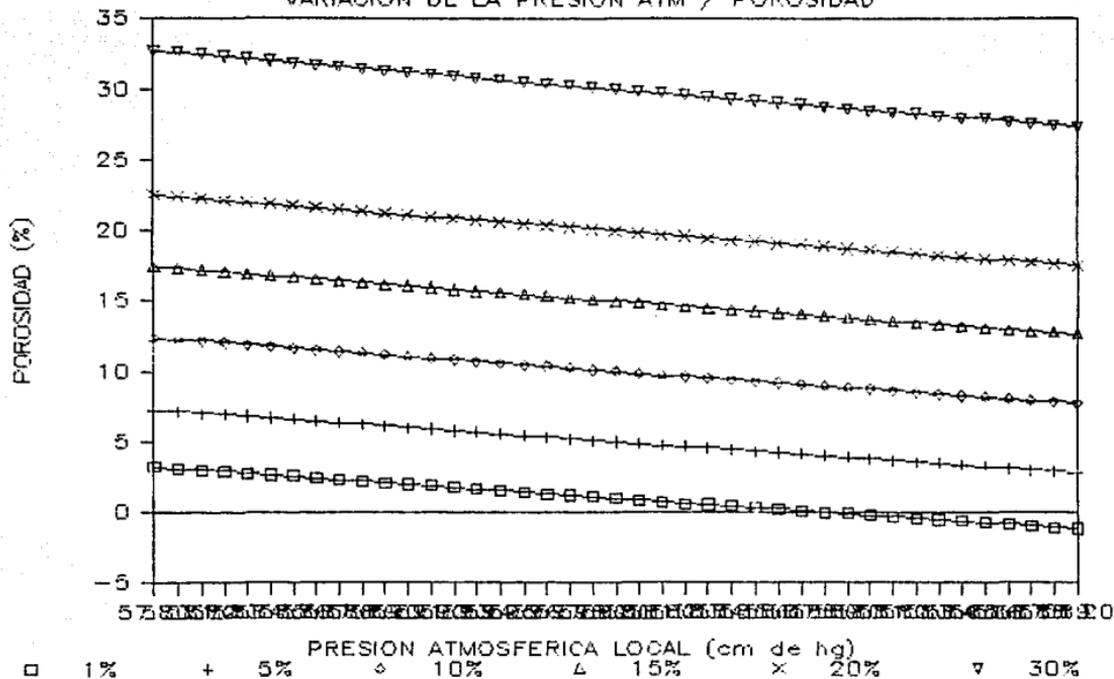
T A B L A D E L A M U E S T R A # 2

VARIACION DE LA PRESTION ATMOSFERICA LOCAL \ POROSIDAD

PRESTION ATMOSFERICA LOCAL (cm de hg)	POROSIDAD (1%)	POROSIDAD (5%)	POROSIDAD (10%)	POROSIDAD (15%)	POROSIDAD (20%)	POROSIDAD (30%)
57.80	3.19	7.27	12.36	17.45	22.55	32.74
57.81	3.08	7.15	12.24	17.35	22.42	32.60
57.82	2.97	7.04	12.12	17.20	22.29	32.46
57.83	2.86	6.92	12.00	17.08	22.16	32.32
57.84	2.75	6.81	11.88	16.95	22.03	32.18
57.85	2.64	6.69	11.76	16.83	21.90	32.05
57.86	2.53	6.58	11.64	16.71	21.77	31.91
57.87	2.42	6.47	11.52	16.58	21.65	31.77
57.88	2.31	6.35	11.41	16.46	21.52	31.63
57.89	2.20	6.24	11.29	16.34	21.39	31.50
57.90	2.09	6.12	11.17	16.21	21.26	31.36
57.91	1.98	6.01	11.05	16.09	21.13	31.22
57.92	1.87	5.90	10.93	15.97	21.01	31.08
57.93	1.76	5.78	10.82	15.85	20.88	30.95
57.94	1.65	5.67	10.70	15.72	20.75	30.81
57.95	1.54	5.56	10.58	15.60	20.63	30.67
57.96	1.43	5.45	10.46	15.48	20.50	30.54
57.97	1.32	5.33	10.35	15.36	20.37	30.40
57.98	1.21	5.22	10.23	15.24	20.25	30.27
57.99	1.10	5.11	10.11	15.12	20.12	30.13
58.00	1.00	5.00	10.00	15.00	20.00	30.00
58.01	0.89	4.88	9.88	14.87	19.87	29.86
58.02	0.78	4.77	9.76	14.75	19.74	29.72
58.03	0.67	4.66	9.65	14.63	19.62	29.59
58.04	0.56	4.55	9.53	14.51	19.49	29.45
58.05	0.45	4.44	9.41	14.39	19.37	29.32
58.06	0.34	4.32	9.30	14.27	19.24	29.18
58.07	0.24	4.21	9.18	14.15	19.12	29.05
58.08	0.13	4.10	9.07	14.03	18.99	28.92
58.09	0.02	3.99	8.95	13.91	18.87	28.78
58.10	-0.08	3.88	8.83	13.79	18.74	28.65
58.11	-0.18	3.77	8.72	13.67	18.62	28.51
58.12	-0.29	3.66	8.60	13.55	18.49	28.38
58.13	-0.40	3.55	8.49	13.43	18.37	28.25
58.14	-0.50	3.44	8.37	13.31	18.25	28.11
58.15	-0.61	3.33	8.26	13.19	18.12	27.98
58.16	-0.72	3.22	8.14	13.07	18.00	27.85
58.17	-0.83	3.11	8.03	12.95	17.88	27.72
58.18	-0.93	3.00	7.92	12.83	17.75	27.58
58.19	-1.04	2.89	7.80	12.72	17.63	27.45
58.20	-1.15	2.78	7.69	12.60	17.51	27.32

GRAFICA # 8

VARIACION DE LA PRESION ATM / POROSIDAD



C) CUADROS COMPARATIVOS DE LOS
ERRORES (TABLAS Y GRAFICAS)

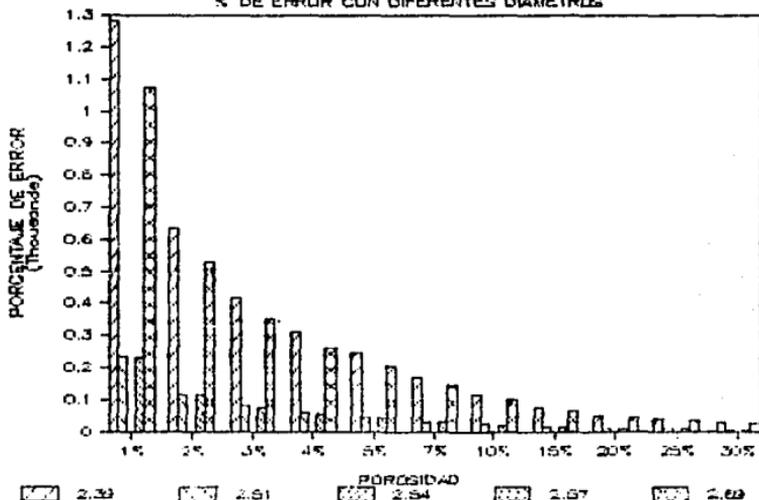
T A B L A # 9

CUADRO COMPARATIVO
MUESTRA # 1

POROSIDAD	% DE ERROR CON DIFERENTES DIAMETROS (cm)				2.69
	2.39	2.51	2.54	2.57	
1%	1281	238	0	229	1073
2%	634	117	0	113	531
3%	418	78	0	75	350
4%	310	57	0	55	260
5%	245	45	0	43	205
7%	172	31	0	30	144
10%	116	21	0	20	97
15%	73	13	0	13	61
20%	51	9	0	9	43
25%	38	7	0	6	32
30%	30	5	0	5	25

GRAFICA # 9

% DE ERROR CON DIFERENTES DIAMETROS



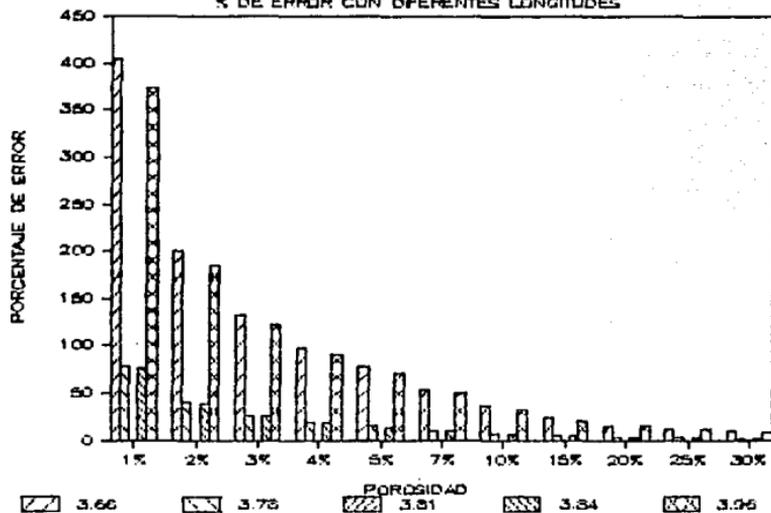
T A B L A # 1 0

CUADRO COMPARATIVO
MUESTRA # 1

POROSIDAD	% DE ERROR CON DIFERENTES LONGITUDES (cm)				
	3.66	3.78	3.81	3.84	3.96
1%	405	79	0	77	373
2%	200	39	0	38	185
3%	132	25	0	25	122
4%	98	19	0	18	90
5%	78	15	0	14	71
7%	54	10	0	10	50
10%	36	7	0	6	33
15%	23	4	0	4	21
20%	16	3	0	3	15
25%	12	2	0	2	11
30%	9	1	0	1	8

GRAFICA # 10

% DE ERROR CON DIFERENTES LONGITUDES



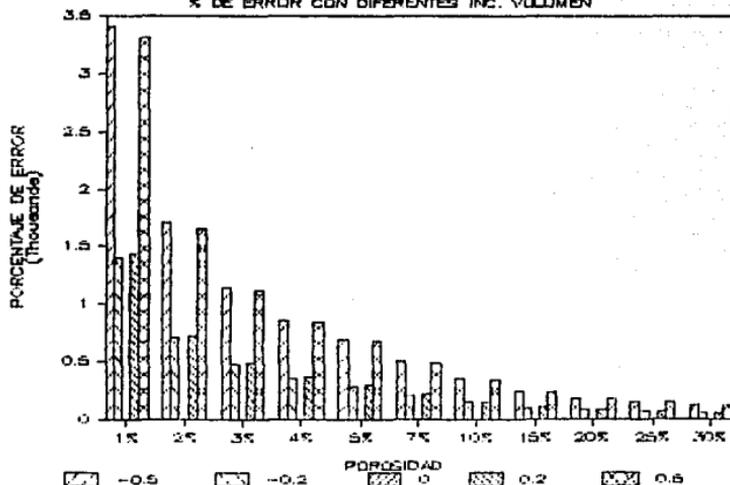
T A B L A # 1 1

CUADRO COMPARATIVO
MUESTRA # 1

POROSIDAD	% DE ERROR CON DIFERENTES INCREMENTOS DE VOLUMEN (cm ³)					VALOR REAL
	-0.5	-0.2	0	0.2	0.5	
1%	3406	1395	0	1440	3309	37.54
2%	1706	699	0	722	1658	37.55
3%	1140	467	0	482	1108	37.57
4%	857	351	0	362	833	37.58
5%	687	281	0	290	668	37.60
7%	493	202	0	208	479	37.62
10%	347	142	0	147	337	37.67
15%	234	96	0	99	227	37.73
20%	177	72	0	75	172	37.80
25%	143	58	0	60	139	37.87
30%	120	49	0	51	117	37.94

GRAFICA # 11

% DE ERROR CON DIFERENTES INC. VOLUMEN

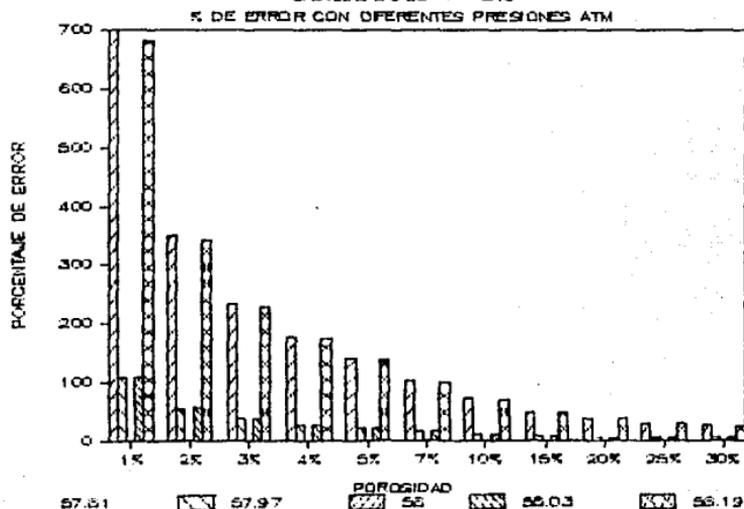


T A B L A # 1 2

CUADRO COMPARATIVO
MUESTRA # 1

POROSIDAD	% DE ERROR CON DIFERENTES PRESION ATMOSFERICA LOCAL (cm de hg)				
	57.81	57.97	58	58.03	58.19
1%	700	108	0	109	682
2%	351	54	0	55	342
3%	234	36	0	36	228
4%	176	27	0	27	172
5%	141	21	0	22	138
7%	101	15	0	15	99
10%	71	11	0	11	70
15%	48	7	0	7	47
20%	36	5	0	5	36
25%	29	4	0	4	29
30%	25	3	0	3	24

GRAFICA # 12



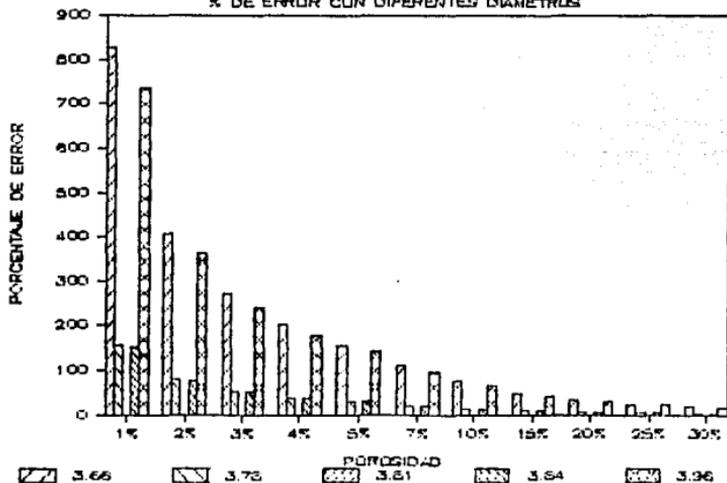
T A B L A # 1 3

CUADRO COMPARATIVO
MUESTRA # 2

POROSIDAD	% DE ERROR CON DIFERENTES DIAMETROS (cm)				
	3.66	3.78	3.81	3.84	3.96
1%	828	157	0	154	735
2%	409	78	0	76	364
3%	270	51	0	50	239
4%	200	38	0	37	178
5%	158	30	0	29	141
7%	111	21	0	20	98
10%	75	14	0	13	66
15%	47	9	0	8	42
20%	33	6	0	6	29
25%	25	5	0	5	22
30%	19	3	0	3	17

GRAFICA # 13

% DE ERROR CON DIFERENTES DIAMETROS



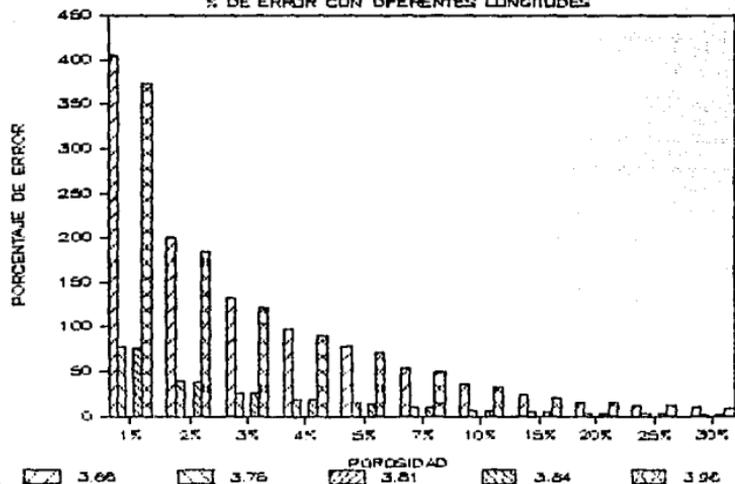
T A B L A # 1 4

C U A D R O C O M P A R A T I V O
M U E S T R A # 2

POROSIDAD	% DE ERROR CON DIFERENTES LONGITUDES (cm)				
	3.66	3.78	3.81	3.84	3.96
1%	405	79	0	77	373
2%	200	39	0	38	185
3%	132	25	0	25	122
4%	98	19	0	18	90
5%	78	15	0	14	71
7%	54	10	0	10	50
10%	36	7	0	6	33
15%	23	4	0	4	21
20%	16	3	0	3	15
25%	12	2	0	2	11
30%	9	1	0	1	8

G R A F I C A # 1 4

% DE ERROR CON DIFERENTES LONGITUDES

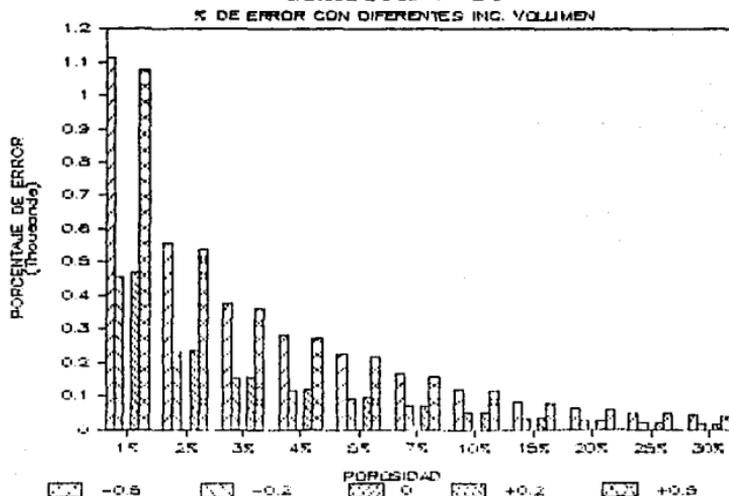


T A B L A # 1 5

C U A D R O C O M P A R A T I V O
M U E S T R A # 2

POROSIDAD	% DE ERROR CON DIFERENTES INCREMENTOS DE VOLUMEN (cm ³)					VALOR REAL
	-0.5	-0.2	0	0.2	0.5	
1%	1114	455	0	467	1074	35.50
2%	560	229	0	235	540	35.55
3%	376	153	0	158	362	35.59
4%	283	116	0	119	273	35.63
5%	228	93	0	96	220	35.67
7%	165	67	0	69	159	35.76
10%	117	48	0	49	113	35.88
15%	80	33	0	34	78	36.08
20%	62	25	0	26	60	36.28
25%	51	21	0	21	49	36.47
30%	44	18	0	18	42	36.65

GRAFICA # 15

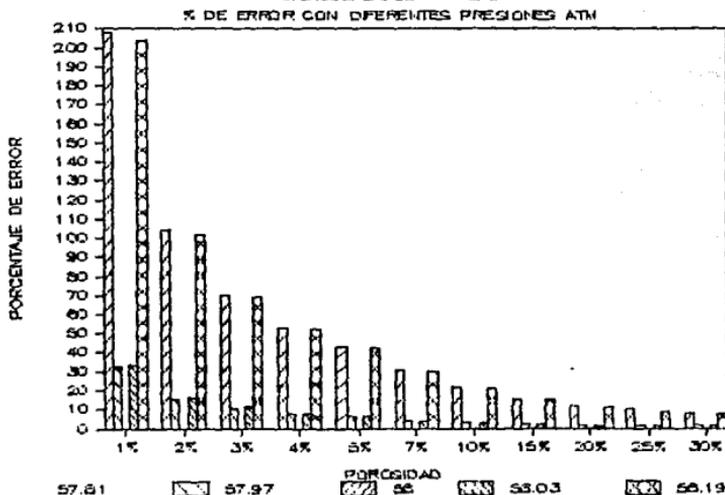


T A B L A # 1 6

CUADRO COMPARATIVO
MUESTRA # 2

POROSIDAD	% DE ERROR CON DIFERENTES PRESION ATMOSFERICA LOCAL (cm de hg)				
	57.81	57.97	58	58.03	58.19
1%	208	32	0	33	204
2%	104	15	0	16	102
3%	70	10	0	11	69
4%	53	8	0	8	52
5%	43	6	0	6	42
7%	31	4	0	4	30
10%	22	3	0	3	21
15%	15	2	0	2	15
20%	12	1	0	1	11
25%	10	1	0	1	9
30%	8	1	0	1	8

GRAFICA # 16



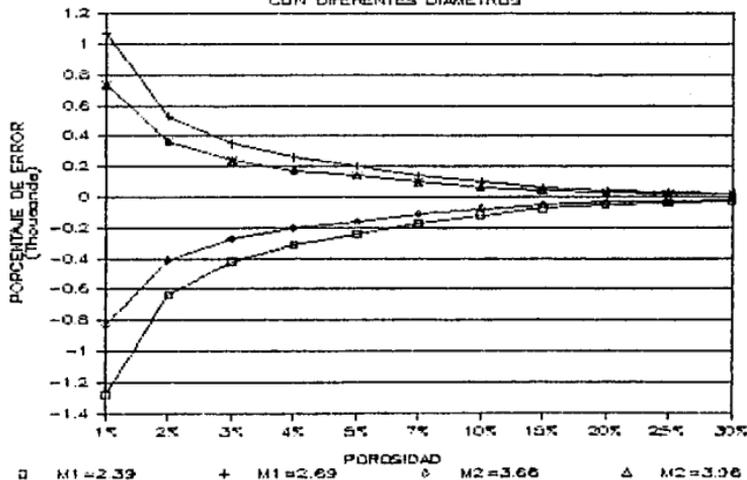
D) CUADROS COMPARATIVOS DE LOS
ERRORES COMPARANDO AMBAS MUESTRAS
(TABLAS Y GRAFICAS)

T A B L A # 1 7

CUADRO COMPARATIVO
ENTRE MUESTRAS
CON DIFERENTES DIAMETROS

POROSIDAD =====	MUESTRA # 1		MUESTRA # 2	
	2.39 =====	2.69 =====	3.66 =====	3.96 =====
1%	(1,281)	1,073	(828)	735
2%	(634)	531	(409)	364
3%	(418)	350	(270)	239
4%	(310)	260	(200)	178
5%	(245)	205	(158)	141
7%	(172)	144	(111)	98
10%	(116)	97	(75)	66
15%	(73)	61	(47)	42
20%	(51)	43	(33)	29
25%	(38)	32	(25)	22
30%	(30)	25	(19)	17

GRAFICA # 17
CON DIFERENTES DIAMETROS

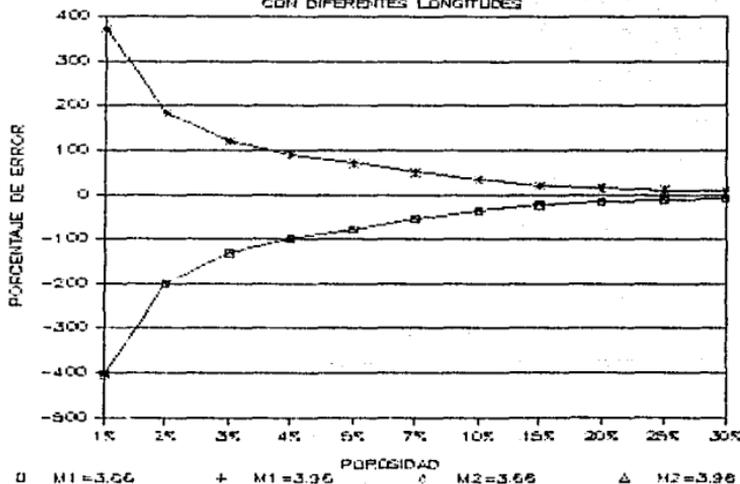


T A B L A # 1 8

CUADRO COMPARATIVO
ENTRE MUESTRAS
CON DIFERENTES LONGITUDES

POROSIDAD	MUESTRA # 1		MUESTRA # 2	
	3.66	3.96	3.66	3.96
1%	(405)	373	(405)	373
2%	(200)	185	(200)	185
3%	(132)	122	(132)	122
4%	(98)	90	(98)	90
5%	(78)	71	(78)	71
7%	(54)	50	(54)	50
10%	(36)	33	(36)	33
15%	(23)	21	(23)	21
20%	(16)	15	(16)	15
25%	(12)	11	(12)	11
30%	(9)	8	(9)	8

GRAFICA # 18
CON DIFERENTES LONGITUDES



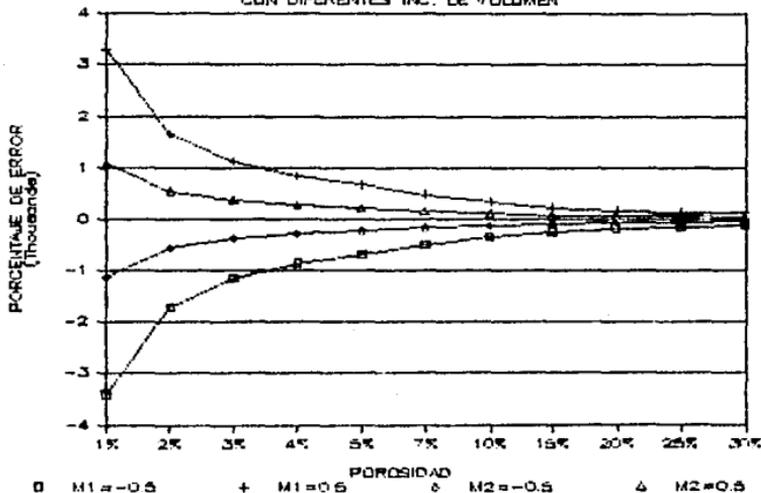
T A B L A # 1 9

CUADRO COMPARATIVO
ENTRE MUESTRAS
CON DIFERENTES INC. DE VOLUMEN

POROSIDAD	MUESTRA # 1		MUESTRA # 2	
	-0.5	0.5	-0.5	0.5
1%	(3,406)	3309	(1,114)	1074
2%	(1,706)	1658	(560)	540
3%	(1,140)	1108	(376)	362
4%	(857)	833	(283)	273
5%	(687)	668	(228)	220
7%	(493)	479	(165)	159
10%	(347)	337	(117)	113
15%	(234)	227	(80)	78
20%	(177)	172	(62)	60
25%	(143)	139	(51)	49
30%	(120)	117	(44)	42

GRAFICA # 19

CON DIFERENTES INC. DE VOLUMEN

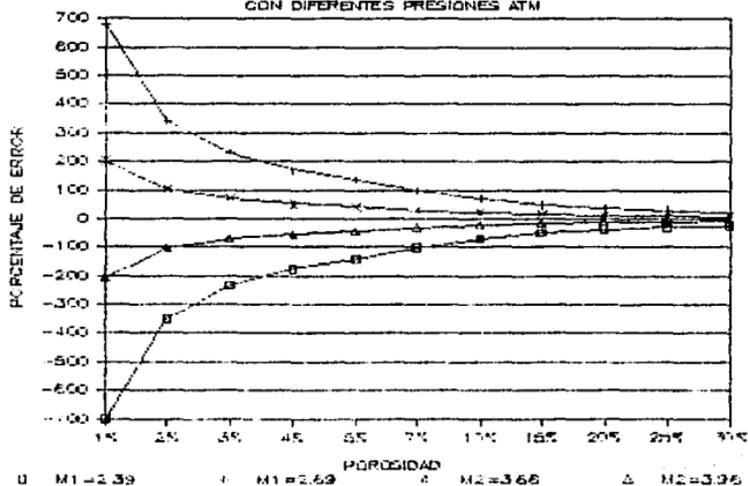


T A B L A # 2 0

CUADRO COMPARATIVO
ENTRE MUESTRAS
CON DIFERENTES PRESIONES ATM

POROSIDAD	MUESTRA # 1		MUESTRA # 2	
	2.39	2.69	3.66	3.96
1%	(700)	682	(208)	204
2%	(351)	342	(104)	102
3%	(234)	228	(70)	69
4%	(176)	172	(53)	52
5%	(141)	138	(43)	42
7%	(101)	99	(31)	30
10%	(71)	70	(22)	21
15%	(48)	47	(15)	15
20%	(36)	36	(12)	11
25%	(29)	29	(10)	9
30%	(25)	24	(8)	8

GRAFICA # 20
CON DIFERENTES PRESIONES ATM



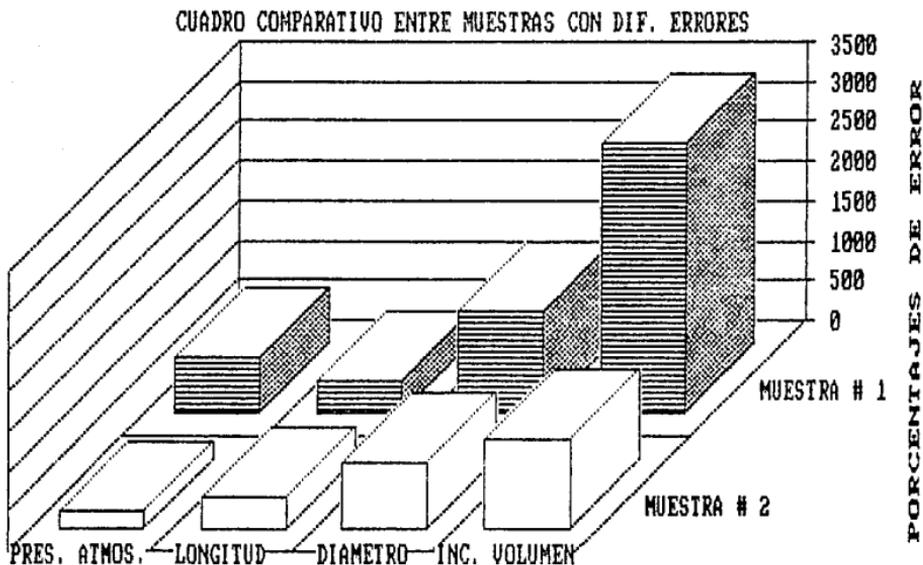
E) CUADRO COMPARATIVO GLOBAL
DE LOS MAXIMOS ERRORES
(TABLA Y GRAFICA)

CUADRO COMPARATIVO GLOBAL
DE LOS MAXIMOS ERRORES

TABLA # 21

PARAMETRO	MAXIMOS PORCENTAJES DE ERROR COMETIDO	
	MUESTRA # 1	MUESTRA # 2
INCREMENTO DEL VOLUMEN	6,876 %	2,221 %
DIAMETRO	1,281 %	828 %
PRESION ATMOSFERICA	700 %	208 %
LONGITUD	405 %	405 %

GRAFICA # 21



CAPITULO VIII

CONCLUSIONES

Como se indicó anteriormente los errores que interesan en este trabajo son aquellos que se generan al medir los parámetros que intervienen en las expresiones matemáticas correspondientes al equipo tipo Boyle de baja presión, los cuales son : el Incremento del volumen (DV), la Presión atmosférica (Patm), la Longitud de la muestra (L) y el Diámetro de la muestra (d). Estos parámetros están contenidos en las siguientes formulas.

$$V_{cm} \text{ o } V_{cv} = \frac{DV}{\frac{Patm}{m DV} - 1} \text{ ----- (VIII.1)}$$

$$V_r = \pi \frac{d^2}{4} L \text{ ----- (VIII.2)}$$

Para establecer las conclusiones de este trabajo se tomaron en cuenta las tablas y las gráficas preparadas con base en los resultados de la corrida del programa, es por esto que las conclusiones se presentan de acuerdo a los resultados generados de este análisis.

DEL RESUMEN DE LAS POROSIDADES OBTENIDAS (VII.4, inciso B)

Se obtuvieron las siguientes conclusiones para ambas muestras:

- a) Para las Variaciones del Diámetro contra Porosidad y de la Longitud contra Porosidad

Se observa que los errores que se cometen en la medición del Diámetro y de la Longitud arrojan resultados con comportamiento lineal y pendiente positiva. Si se miden valores menores al real para muestras de porosidad baja se pueden obtener valores negativos de porosidad y esto en la realidad no sucede (Gráficas 1, 2, 5 y 6).

También se observa que si el Diámetro (d) o la Longitud (L) de la muestra se aumenta, la porosidad aumenta también y que si el Diámetro (d) o la Longitud (L) disminuyen, las porosidades disminuyen (Tablas 1, 2, 5 y 6). Esto parecería ser lógico, ya que si se considera la fórmula:

$$\phi = \frac{V_p}{V_r}$$

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Sucede lo contrario, o sea, que al aumentar el Diámetro (d) o la Longitud (L) se aumenta el Volumen de Roca (Vr) que se encuentra en el denominador haciendo que la porosidad (p) disminuya, ya que el Volumen de Poros (Vp) se mantiene constante.

El comportamiento aparentemente ilógico que se observa en las gráficas se debe a la forma como se calcula el Volumen de Roca (Vr) en el procedimiento utilizado en este trabajo y que a continuación se detalla.

Los parámetros (d) y (L) están involucrados en la siguiente fórmula:

$$V_r = \frac{\pi d^2 L}{4} \text{ ----- (VIII.3)}$$

El Volumen de Roca (Vr) a su vez es utilizado para obtener la porosidad (p) a partir de la siguiente ecuación:

$$p = \frac{V_r - V_s}{V_r} \text{ ----- (VIII.4)}$$

De esta manera, si el diámetro (d) o la longitud (L) aumenta el Volumen de Roca (Vr) también aumenta por estar estos dos parámetros en el numerador y por consiguiente la Porosidad (p) se incrementará, ya que el Volumen de Roca (Vr) se encuentra tanto en el numerador como en el denominador de la ecuación.

Es por esto que en este trabajo en lugar de disminuir la porosidad (p) conforme aumenta el Diámetro (d) o la Longitud (L) se ve incrementada, debido a que en el programa de computo se obtuvo la porosidad a partir de la ecuación (VIII.4).

b) Para la Variación del Incremento del Volumen contra Porosidad

Para los errores que se cometen en el Incremento de Volumen no fue posible realizar gráficas como las anteriores, debido a que es un parámetro que va cambiando de acuerdo a la porosidad de la muestra (Tablas 3 y 7); pero tomando en cuenta las gráficas (Gráficas 3 y 7) que se presentan se deduce que se comportan en forma lineal para las diferentes porosidades, de acuerdo al valor del incremento del volumen.

c) Para la Variación de la Presión Atmosférica contra Porosidad

Para la Presión Atmosférica se invierte la pendiente de los resultados, continúa siendo lineal el comportamiento pero con pendiente negativa (Gráficas 4 y 8). Si se miden valores mayores al real para muestras de porosidad baja se pueden obtener valores negativos de porosidad.

Esto se debe a que la Presión Atmosférica (Patm) se encuentra en el denominador de la ecuación (VIII.1) para el cálculo del Volumen de Celda (Vc) por lo que al aumentar la Presión Atmosférica (Patm) disminuye el valor de la Porosidad (ϕ) obtenida (Tablas 4 y 8).

DE LOS CUADROS COMPARATIVOS DE LOS ERRORES (VII.4, inciso C)

De estos Cuadros Comparativos se observó que:

a) Porcentaje de Error con diferentes Diámetros

Para los Cuadros Comparativos de las Muestras 1 y 2 los mayores porcentajes de error se cometen al medir en menos el diámetro y los menores errores al medirlo en más (Tablas 9 y 13). También se observa que es mayor el error que se comete mientras más baja sea la porosidad de la muestra, es decir, en las porosidades bajas es donde se tiene mayor porcentaje de error (Gráficas 9 y 13).

b) Porcentaje de Error con diferentes Longitudes

En los Cuadros Comparativos de las Muestras 1 y 2 los mayores porcentajes de error se cometen al medir en menos la longitud que al hacerlo en más (Tablas 10 y 14) y en las porosidades bajas es donde se obtiene un mayor porcentaje de error (Gráficas 10 y 14), es decir, pasa lo mismo que en el inciso anterior (a).

c) Porcentaje de Error con diferentes Incrementos de Volumen

En los Cuadros Comparativos de las Muestras 1 y 2 se aprecian mayores errores al medir en más los incrementos del volumen que al hacerlo en menos (Tablas 11 y 15), caso contrario a los incisos anteriores. En este caso también se tienen mayores porcentajes de error para porosidades bajas (Gráficas 11 y 15).

d) Porcentajes de Error con diferentes Presiones Atmosféricas

De acuerdo a los Cuadros Comparativos de las Muestras 1 y 2 sucede lo mismo que en los incisos (a) y (b) anteriores, es decir, los mayores porcentajes de error se cometen al medir en menos la presión atmosférica que al medirlo en más (Tablas 12 y 16) y en las porosidades bajas es donde se obtiene un mayor porcentaje de error (Gráficas 12 y 16).

CAPITULO VIII

DE LOS CUADROS COMPARATIVOS DE LOS ERRORES COMPARANDO AMBAS MUESTRAS (VII.4, inciso D)

Se concluyo lo siguiente:

a) Cuadro Comparativo entre muestras con diferentes Diámetros

En los Cuadros comparativos entre Muestras con diferentes Diámetros, se tienen errores muy grandes cuando la porosidad de la muestra es pequeña (1%) y errores pequeños cuando la porosidad de la muestra es grande (30%) (Tabla 17).

También se observa que la Muestra # 1, de dimensiones menores que la Muestra # 2, tiene mayores porcentajes de error (curvas externas de las gráficas). Esto indica que para muestras pequeñas los errores que se pueden cometer son mayores que para muestras más grandes (Gráfica 17).

b) Cuadro Comparativo entre muestras con diferentes Longitudes

En los cuadros comparativos entre Muestras con diferentes Longitudes, se observa que se tienen errores grandes cuando la porosidad de la muestra es pequeña y errores pequeños cuando la porosidad es grande (Tabla 18), sucede lo mismo que en el inciso anterior (a).

Se observa que tienen el mismo porcentaje de error tanto la Muestra # 1 como la Muestra # 2, esto ocasiona que en la gráfica estén sobrepuestas las dos curvas correspondientes a las mediciones en más y a las dos que se obtienen cuando se hacen mediciones en menos, ya que la longitud de las dos muestras no varía, sino que permanece constante para las dos muestras (Gráfica 18).

c) Cuadro Comparativo entre muestras con diferentes Incrementos de Volumen

En los cuadros comparativos entre muestras con diferentes Incrementos del volumen, se observa algo similar que en las anteriores; es decir, se cometen errores muy grandes si la porosidad de la muestra es baja y errores pequeños si la porosidad de la muestra es alta (Tabla 19). Además, cuando la muestra es pequeña el porcentaje de error que se comete es grande y viceversa (Gráfica 19).

d) Cuadro Comparativo entre muestras con diferentes Presiones Atmosféricas

En los cuadros comparativos entre muestras con diferentes Presiones Atmosféricas sucede lo mismo que en los incisos (a) y (b) anteriores (Tabla y Gráfica 20).

Resumiendo, en los cuadros comparativos entre muestras se observa a partir de las cuatro gráficas (Diámetro, Longitud, Presión Atmosférica e Incremento del volumen) lo siguiente: entre menor sea la muestra (Muestra # 1) mayor será el porcentaje de error que se comete o entre mayor sea la muestra (Muestra # 2) menor será el porcentaje de error que se comete. Esto demuestra que de preferencia se deben analizar muestras lo más grande posible.

**DEL CUADRO COMPARATIVO GLOBAL DE LOS MAXIMOS ERRORES
(VII.4, inciso E)**

Se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- *Se tiene un mayor porcentaje de error en la porosidad al medir el Incremento del Volumen, debido a que el Incremento de Volumen (DV) se encuentra en el numerador de la ecuación (VIII.1) utilizada para obtener el Volumen de Celda (Vc), que después se utiliza para obtener la Porosidad (P).*

Le siguen en forma decreciente los casos correspondientes al Diámetro, la Longitud y la Presión Atmosférica para la Muestra #2. Para la Muestra #1 el comportamiento es similar excepto para el caso de la Longitud, que al ser constante para ambas muestras no mantiene la tendencia de la Muestra #1 (Gráfica 21).

- *Son mayores los porcentajes de error en la Muestra #1 (muestra pequeña) que en la Muestra #2 (muestra grande) para tres de los cuatro parámetros analizados en esta tesis. Los porcentajes de error originados por malas mediciones de la Longitud son iguales (Tabla 21).*

No es posible establecer una relación directa entre los porcentajes de error cometidos y los cuatro parámetros analizados, debido a que los errores de apreciación en la medición son distintos.

CAPITULO IX

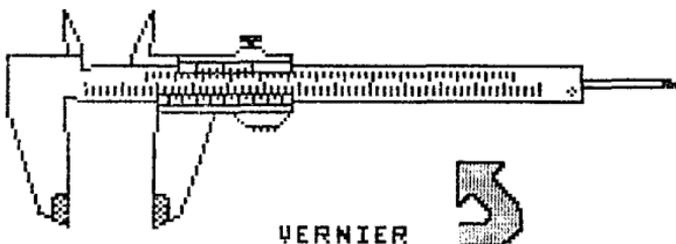
RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos se puede recomendar lo siguiente:

Se debe tener mucho cuidado al momento de tomar las lecturas de los parámetros analizados (Diámetro, Longitud, Presión Atmosférica e Incremento del Volumen) y seguir las siguientes recomendaciones, según sea el caso:

a) Cuando se tomen las lecturas de diámetro (d) y longitud (L) con el vernier se deben hacer con sumo cuidado y con la mayor exactitud posible (Fotografía No. 7), ya que en el vernier se pueden obtener medidas hasta de milímetros en forma exacta y en forma aproximada hasta cinco centésimas de mm (0.05 mm), esto último debido a que el vernier cuenta con una regla graduada cada 0.05 mm. Estas graduaciones deben coincidir con una graduación del vernier graduada cada mm (Figura No. 5).

Figura No.5 Toma de lecturas con el Vernier

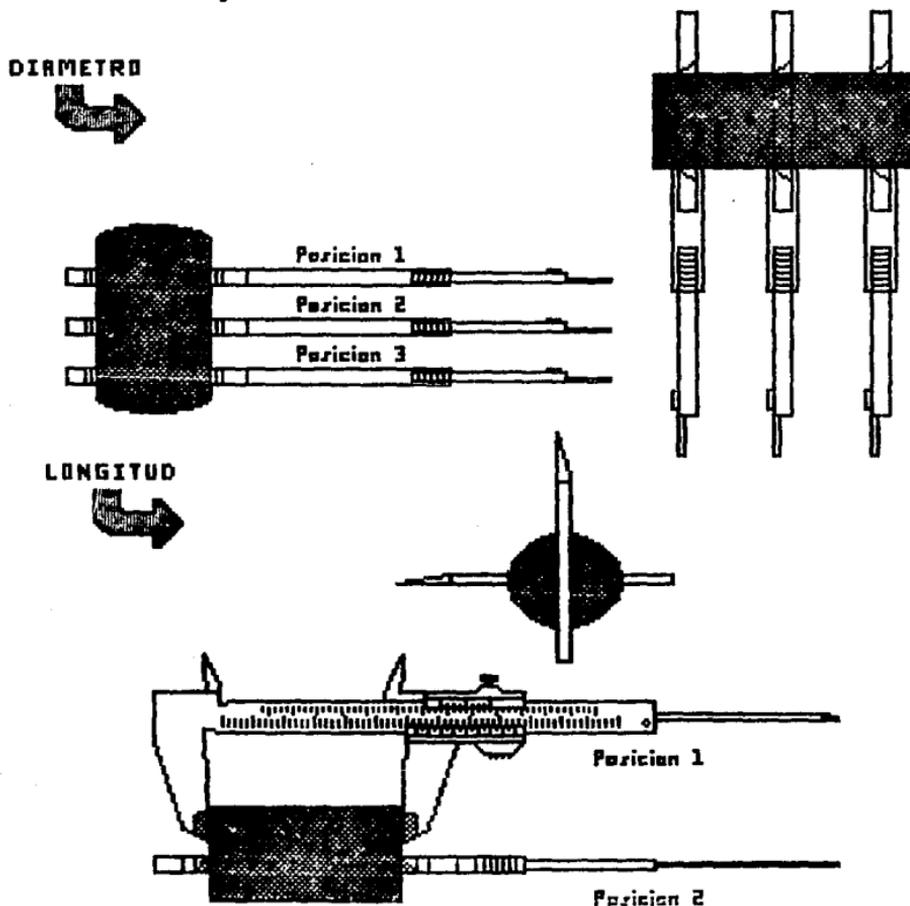


Fotografía No. 7



d) Realizar varias medidas colocando en diferentes posiciones el vernier y obtener un promedio de éstas, tanto al medir la longitud (L) como al medir el diámetro (d) (Figura No. 6).

Figura No. 6 Forma de realizar las medidas



c) Debido a que el mercurio (Hg) es un fluido no mojanete, al hacer contacto con el vidrio forma un menisco y según la posición del observador será el valor de la lectura, según se puede apreciar en la Figura No. 7.

Para tomar la lectura del Incremento del Volumen (DV) o la Presión Atmosférica (Patm) se puede escoger la base del menisco (Figura 7A) o la cima (Figura 7B). Para definir qué es más conveniente, si hacer la medición en la base o en la cima, es necesario observar las siguientes figuras, con el fin de cometer un menor porcentaje de error al momento de tomar la lectura. Se puede apreciar que siempre hay que tomar ya sea la base o la cima como punto de referencia al momento de medir y siempre en una posición horizontal, es decir, perpendicular al menisco.

En la medición del Incremento del Volumen (DV) debe tenerse un mayor cuidado al tomar la lectura, ya que como se indicó en las conclusiones los errores en tal medición originan los mayores porcentajes de error en la porosidad.

Figura No. 7 Errores que se pueden cometer al tomar las lecturas de Incremento de Volumen o la Presión Atmosférica

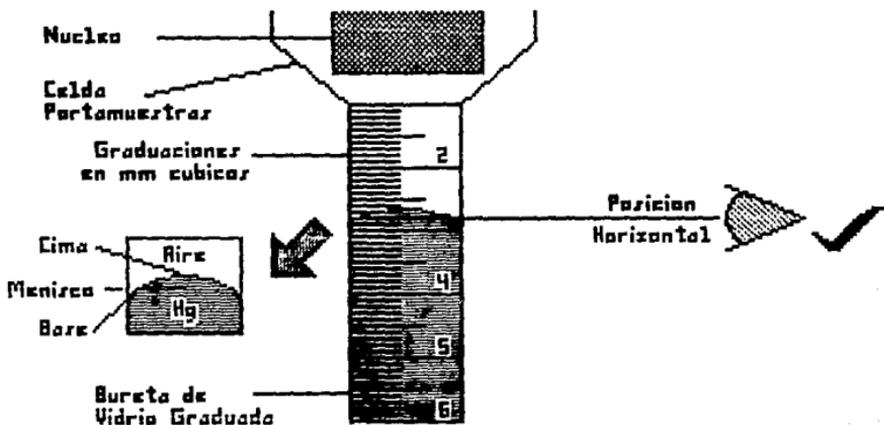


Figura No. 7A

Lectura tomada la Base



Posicion Horizontal



Posicion No Horizontal

Figura No. 7B

Lectura tomada la Cima



Posicion Horizontal



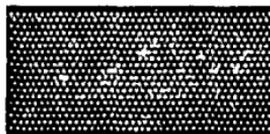
Posicion No Horizontal

d) Se sugiere utilizar muestras lo mas grande posible ya que entre mayor sea la muestra menor sera el porcentaje de error que se cometa, como se indic6 en las conclusiones (Figura No. 8).

Figura No. 8 Comparacion entre los tamanos de Muestra



MUESTRA CHICA
MAYOR
% DE ERROR



MUESTRA GRANDE
MENOR
% DE ERROR

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Amyx J. W., Bas D. M. y Whitting R. L.
"Petroleum Reservoir Engineering - Physical Properties".
Mc Graw Hill Book Co. (1960).
- 2.- Landes K. K.
"Geología del Petróleo".
Ediciones Omega, S.A. Barcelona (1977).
- 3.- Aguilera L. Mario E.
"El Manejo de Datos Petrofísicos para el estudio de
Yacimientos".
Tesis Profesional. Facultad de Ingeniería, UNAM. (1985).
- 4.- Keelan D.
World Oil (Marzo 1985).
- 5.- Villamar V. M.
"Laboratorio de Yacimientos".
Notas de Clase. Facultad de Ingeniería, UNAM. (1986).
- 6.- Robert P. Monicard.
"Properties of Reservoir Rocks: Core Analysis".
Graham and Trotman Ltd. (1980).
- 7.- Anderson G.
"Coring and Core Analysis Handbook".
J.P.T.(Abril 1978)
- 8.- Félix E.A., Oyarzabal O.J. y Velasco H.M.
"Lecciones de Física".
C.E.C.S.A. (1979).
- 9.- Iriarte B. R., Borrás G.H. y Durán C.R.
"Apuntes de Métodos Numéricos".
Facultad de Ingeniería, UNAM. (1983).