



# UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO.

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL.

“Desarrollo e Implementación de un Equipo Triaxial  
con Medición de Presión de Poro y Medición de  
Cambio de Volumen”.

Tesis Profesional.

Que para obtener el Título de:

*Ingeniero Civil.*

Presenta:

*Juan Carlos Peniche Zavala.*

Asesor:

*Dr. Carlos Chávez Negrete.*

Morelia, Michoacán.

Abril 2008.



## Introducción.

Debido a la importancia que tiene la determinación del esfuerzo efectivo de los suelos para la estabilidad en las obras civiles, la elaboración de esta tesis constituye un instrumento valioso para los ingenieros especializados en el área de Mecánica de Suelos.

## Objetivos y Alcances.

El objetivo de nuestra investigación es el de desarrollar un equipo de pruebas triaxiales completo y actualizado. Puesto que vivimos en un mundo de desarrollo constante, lo cual nos lleva a una mejorar la tecnología para la realización de las pruebas triaxiales.

Esta idea surgió, después de observar en el laboratorio de materiales un marco de compresión instrumentado (**MasterLoader HM-3000**), que tan solo era utilizado para la realización de pruebas Marshall, pudiendo realizarse distintos tipos de pruebas de compresión con ayuda de este marco. Por otra parte se contaba con un equipo antiguo de presión de poro, el cual se encontraba obsoleto, por lo que se pensó en recuperar parte de éste equipo.

Del equipo triaxial antiguo, fue utilizado un conjunto de válvulas, el cual ha sido montado en un panel de control de presiones, para poder realizar la saturación de una muestra de suelo en estudio. También se intentó recuperar el transductor de presión, el cual se conectó al equipo de medición del marco de carga y la cámara triaxial. Logrando así adquirir los cambios de presión de poro sufridos en el espécimen durante el ensayo.

Una vez realizados estos dos equipos, se vio la necesidad de diseñar y construir un equipo de medición de cambio de volumen, para registrar los cambios que sufriera el espécimen durante la realización de un ensayo. Por lo

cual fue implementado un sistema, con una bureta interior, para la medición de volumen, así como un panel de control de flujo para dicho sistema.

Cuando fue implementado el transductor de presión al marco, tuvo que ser realizada una calibración del mismo, que fue almacenada en el marco de carga. Después de la calibración se dio inicio a la realización de los primeros ensayos, pero debido a que el transductor era muy antiguo, sufrió una falla durante la ejecución de la primera prueba, por lo cual no pudieron realizarse ensayos con el equipo. Sin embargo en la actualidad se está adquiriendo uno nuevo. Con esto el equipo estará completo para realizar pruebas

Debido al tiempo que se invirtió en él desarrollo de esta tesis se decidió sólo dejar a punto el equipo. El desempeño del equipo en las diferentes pruebas será evaluado en otro trabajo. A lo largo de esta tesis se hará mención sobre el procedimiento para la realización de las pruebas de compresión triaxial rápida, consolidada-no drenada con medición de presión de poro y consolidada-drenada con medición de presión de poro.

Es importante mencionar que dicho equipo es posible adquirió en el mercado, sin embargo su costo es alto. Por lo cual, se decidió aprovechar el equipo existente, con ello se redujeron los costos.

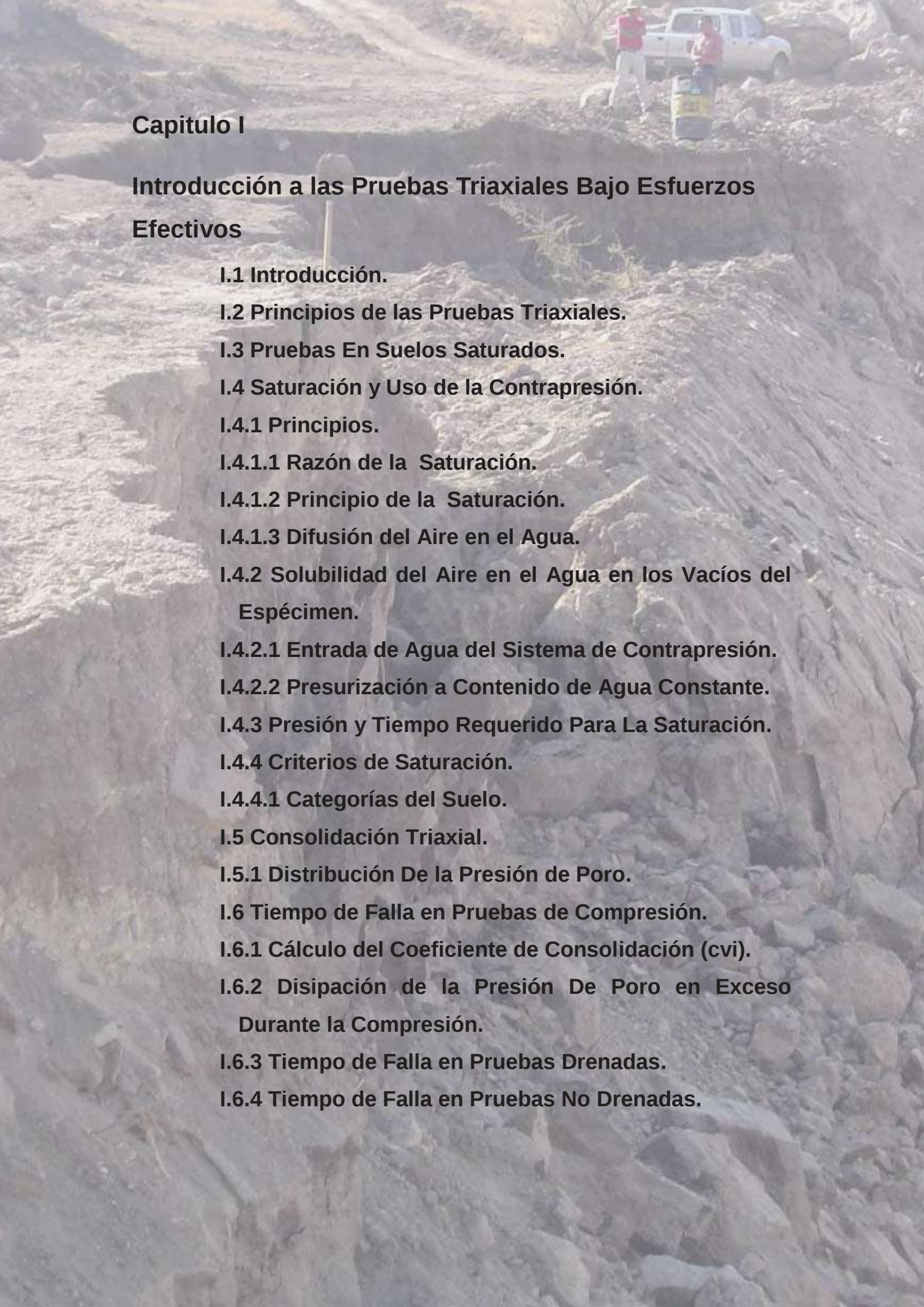
**Capitulo I Introducción a las Pruebas Triaxiales Bajo Esfuerzos Efectivos**

|                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| .....                                                                          | <b>.7</b> |
| I.1 Introducción.....                                                          | 7         |
| I.2 Principios de las Pruebas Triaxiales.....                                  | 8         |
| I.3 Pruebas En Suelos Saturados.....                                           | 11        |
| I.4 Saturación y Uso de la Contrapresión.....                                  | 18        |
| I.4.1 Principios.....                                                          | 18        |
| I.4.1.1 Razón de la Saturación.....                                            | 18        |
| I.4.1.2 Principio de la Saturación.....                                        | 18        |
| I.4.1.3 Difusión del Aire en el Agua.....                                      | 19        |
| I.4.2 Solubilidad del Aire en el Agua en los Vacíos del Espécimen.....         | 20        |
| I.4.2.1 Entrada de Agua del Sistema de Contrapresión.....                      | 20        |
| I.4.2.2 Presurización a Contenido de Agua Constante.....                       | 21        |
| I.4.3 Presión y Tiempo Requerido Para La Saturación.....                       | 23        |
| I.4.4 Criterios de Saturación.....                                             | 25        |
| I.4.4.1 Categorías del Suelo.....                                              | 25        |
| I.5 Consolidación Triaxial.....                                                | 26        |
| I.5.1 Distribución De la Presión de Poro.....                                  | 27        |
| I.6 Tiempo de Falla en Pruebas de Compresión.....                              | 28        |
| I.6.1 Cálculo del Coeficiente de Consolidación (cvi).....                      | 28        |
| I.6.2 Disipación de la Presión De Poro en Exceso Durante la<br>Compresión..... | 30        |
| I.6.3 Tiempo de Falla en Pruebas Drenadas.....                                 | 30        |
| I.6.4 Tiempo de Falla en Pruebas No Drenadas.....                              | 31        |

**Capitulo II Pruebas de Esfuerzo Efectivo- Principios, Teoria y Aplicaciones..... 35**

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| II.1 Introducción.....                                              | 35 |
| II.1.1 Historia.....                                                | 35 |
| II.2. Principios de Esfuerzo Efectivo.....                          | 36 |
| II.2.1 Componentes Del Suelo.....                                   | 36 |
| II.2.2 Transmisión del Esfuerzo Normal en Suelo Saturado.....       | 38 |
| II.2.3 Compresibilidad.....                                         | 41 |
| II.2.4 Transmisión de Esfuerzos Cortantes en un Suelo Saturado..... | 42 |

|                                                                                                       |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| II.2.5 Coeficientes de Presión de Poro en Suelos Saturados .....                                      | 49         |
| II.2.5.1 Cambios de Esfuerzo Total y de Presión de Poro .....                                         | 49         |
| II.2.5.2 Coeficiente B en Suelos Saturados .....                                                      | 50         |
| II.2.5.3 Coeficiente A en Suelos Saturados .....                                                      | 52         |
| II.2.5.4 Ecuación General de la Presión de Poro.....                                                  | 52         |
| II.2.6 Coeficientes de Presión de Poro en Suelos Parcialmente<br>Saturados .....                      | 53         |
| II.3 Aplicación de Pruebas Triaxiales.....                                                            | 56         |
| <br><b>CAPITULO III Descripción del Equipo de Compresión Triaxial.....</b>                            | <b>58</b>  |
| III.1 Cámara de Compresión Triaxial.....                                                              | 58         |
| III.2 Marco de Carga.....                                                                             | 63         |
| III.3 Censor de Desplazamiento.....                                                                   | 64         |
| III.4 Transductor de Presión.....                                                                     | 65         |
| III.5 Sistema de Alimentación y Control.....                                                          | 65         |
| III.6 Equipo de Adquisición de Datos.....                                                             | 75         |
| III.7 Configuración General del Equipo de Compresión Triaxial con<br>Medición de Presión de Poro..... | 77         |
| <br><b>Capitulo IV Procedimiento Para la Realización de Pruebas Triaxiales.....</b>                   | <b>78</b>  |
| IV.1 Preparación del Espécimen.....                                                                   | 80         |
| IV.2 Preparación del Equipo.....                                                                      | 83         |
| IV.3 Montaje del Espécimen en la Cámara Triaxial.....                                                 | 83         |
| IV.4 Pruebas Rápidas-No Drenadas (UU).....                                                            | 85         |
| IV.5 Saturación del Espécimen.....                                                                    | 89         |
| IV.6 Consolidación del Espécimen .....                                                                | 95         |
| IV.7 Aplicación del Esfuerzo Desviador.....                                                           | 103        |
| IV.7.1 Pruebas Consolidadas-No Drenadas (CU).....                                                     | 103        |
| IV.6.3 Pruebas Consolidadas-Drenadas (CD).....                                                        | 110        |
| <br><b>Bibliografía.....</b>                                                                          | <b>114</b> |



## **Capítulo I**

### **Introducción a las Pruebas Triaxiales Bajo Esfuerzos Efectivos**

**I.1 Introducción.**

**I.2 Principios de las Pruebas Triaxiales.**

**I.3 Pruebas En Suelos Saturados.**

**I.4 Saturación y Uso de la Contrapresión.**

**I.4.1 Principios.**

**I.4.1.1 Razón de la Saturación.**

**I.4.1.2 Principio de la Saturación.**

**I.4.1.3 Difusión del Aire en el Agua.**

**I.4.2 Solubilidad del Aire en el Agua en los Vacíos del Espécimen.**

**I.4.2.1 Entrada de Agua del Sistema de Contrapresión.**

**I.4.2.2 Presurización a Contenido de Agua Constante.**

**I.4.3 Presión y Tiempo Requerido Para La Saturación.**

**I.4.4 Criterios de Saturación.**

**I.4.4.1 Categorías del Suelo.**

**I.5 Consolidación Triaxial.**

**I.5.1 Distribución De la Presión de Poro.**

**I.6 Tiempo de Falla en Pruebas de Compresión.**

**I.6.1 Cálculo del Coeficiente de Consolidación ( $c_v$ ).**

**I.6.2 Disipación de la Presión De Poro en Exceso Durante la Compresión.**

**I.6.3 Tiempo de Falla en Pruebas Drenadas.**

**I.6.4 Tiempo de Falla en Pruebas No Drenadas.**

## Capítulo I

### Introducción a las Pruebas Triaxiales Bajo Esfuerzos Efectivos.

#### I.1 Introducción.

Un factor importante para toda obra civil es el suelo sobre el cual se va a construir, debido a que es la base de toda obra, por lo cual se debe tener un conocimiento claro de sus propiedades físicas, para con ello realizar un análisis más confiable y por consiguiente una obra más segura.

El concepto de Esfuerzo Efectivo es el principio más importante en el área de Mecánica de Suelos de la Ingeniería Civil, puesto que las propiedades mecánicas de todo suelo (compresibilidad, resistencia al esfuerzo cortante y distorsión) están regidas por estos esfuerzos, ya que están directamente relacionadas con la fase sólida del suelo.

Para la obtención de los esfuerzos efectivos se hace uso del Equipo de Pruebas de Compresión Triaxial de Laboratorio (Figura I.1), pero estas no son medidas de manera directa, sino que están en función de los esfuerzos totales y de la presión de poro en el agua. Este último concepto nos lleva a la necesidad de saturar el espécimen, lo cual es logrado por medio de la aplicación de la presión de confinamiento y de la contrapresión, para posteriormente someter a los especímenes a una consolidación y llevarlo a su falla a través de un esfuerzo axial (esfuerzo desviador). Este procedimiento se realiza sobre tres especímenes generalmente para que al final de las pruebas sean obtenidos los parámetros de resistencia ( $c'$  y  $\phi'$ ) por medio de los círculos de Mohr y así obtener la resistencia al esfuerzo cortante ( $\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$ ).



**Figura I.1.- Equipo para ensayos triaxiales.**

En la práctica la mayoría de pruebas de esfuerzo efectivo son realizadas sobre muestras de suelo totalmente saturado, en estado natural o remoldeadas en laboratorio.

## **I.2 Principios de las Pruebas Triaxiales.**

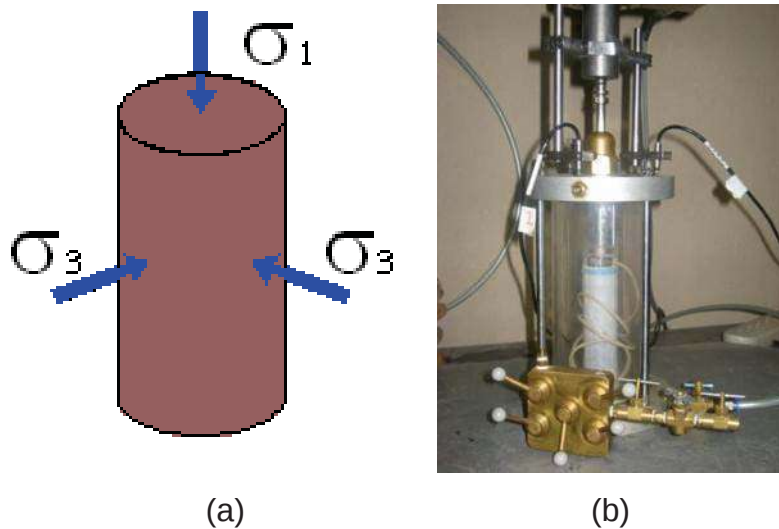
Las pruebas de compresión triaxial son hoy en día las más utilizadas en los laboratorios de mecánica de suelos para la determinación de las características de esfuerzo-deformación y de resistencia de los suelos.

Para comprender mejor el concepto de pruebas de compresión triaxial iniciaremos dando las siguientes definiciones:

- **Compresión:** es una fuerza o presión ejercida sobre un cuerpo con el fin de reducir su volumen.
- **Triaxial:** Hablando literalmente quiere decir con tres ejes, los cuales son perpendiculares entre si.

Con lo anterior podemos decir que una Prueba de Compresión Triaxial en Mecánica de Suelos es someter un espécimen cilíndrico de suelo a fuerzas compresivas en tres planos mutuamente perpendiculares (Figura I.2a). Los cuales son conocidos como planos principales, en los cuales los esfuerzos cortantes son nulos, y sus esfuerzos son conocidos como esfuerzos

principales. En las pruebas efectuadas hoy en día los esfuerzos laterales son iguales y son ejercidos por agua a presión, la cual esta localizada en el interior de la cámara triaxial por lo cual es protegido el espécimen con una membrana impermeable (Figura I.2b). El esfuerzo desviador es transmitido al espécimen por medio de una carga a través de un vástago que atraviesa el cabezal de la cámara triaxial y hace contacto con el cabezal del espécimen y el marco de carga (Figura I.2b).



**Figura I.2.- Fuerzas actuantes en un espécimen sometido a ensayos de compresión triaxial. (a) Esfuerzos principales. (b) Esfuerzos ejercidos por el agua y el marco de carga.**

La presión ejercida por el agua es conocida como esfuerzo confinante y produce los esfuerzos principales laterales y sobre el cabezal del espécimen ( $\sigma_3$ ) en el cual actúa de igual manera el esfuerzo desviador ( $\sigma_d$ ) producido por el marco de carga en el vástago, por lo cual el esfuerzo axial total es la suma de estos esfuerzos ( $\sigma_3 + \sigma_d$ ) dando origen al esfuerzo principal  $\sigma_1$ . Los esfuerzos  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  son conocidos como esfuerzos principales mayor y menor sucesivamente.

Un aspecto importante en la realización de las pruebas triaxiales es la consolidación pues en función de su existencia o ausencia durante la realización de una prueba triaxial se clasifican las pruebas en distintas categorías, por lo cual a continuación se dará una definición breve de esto:

Se denomina **consolidación** de un suelo al proceso de reducción de volumen de los suelos provocado por un aumento de las cargas en los suelos ocurrido en un transcurso de tiempo generalmente largo y es asintótico. Es decir que al comienzo es más rápido y conforme pasa el tiempo se va haciendo más lento hasta que el suelo llega a una nueva situación de equilibrio en la cual el suelo ya no sufre cambios apreciables de disminución de volumen.

En pruebas de compresión triaxial este cambio volumétrico es originado principalmente por la presión de confinamiento y el esfuerzo desviador aplicados sobre el espécimen.

Con lo anterior tenemos que las pruebas de compresión triaxial pueden definirse en varios tipos dependiendo de su consolidación y de la aplicación del esfuerzo desviador que son:

1. **Prueba Rápida-No Drenada (QU) o Prueba No Consolidada-No Drenada (UU):** En estas pruebas tanto la presión hidrostática como la carga axial son aplicadas sin permitir la consolidación de la muestra. Para la realización de estas pruebas los ingleses las realizan de dos formas. La primera consiste en permitir la medición de la presión de poro (UU) por lo cual son conocidos los esfuerzos efectivos y la segunda no la permite (QU) por lo cual el esfuerzo efectivo no puede ser conocido obteniendo con ello tan solo los esfuerzos totales aplicados sobre el espécimen (Head, 1998). Por otra parte de acuerdo a la ASTM en su artículo D2850-03a no realiza la medición de la presión de poro en las pruebas UU al contrario de lo planteado por Head.
2. **Pruebas Consolidadas-No Drenadas (CU):** En la realización de esta prueba es permitido el drenaje dando origen a la consolidación del espécimen originado por la aplicación del esfuerzo de confinamiento. Al terminar la consolidación del espécimen es aplicado el esfuerzo desviador llevando al espécimen a su falla. Durante la aplicación del esfuerzo desviador es impedido el drenaje, por lo cual no existe una

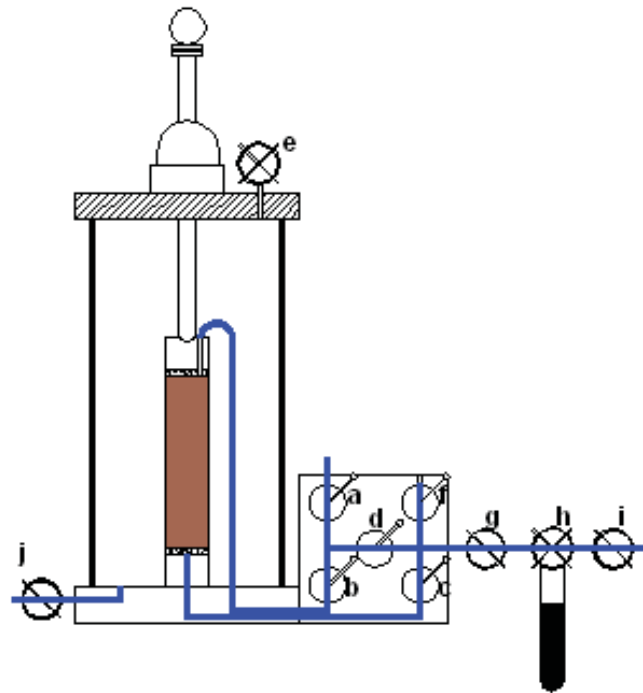
disipación de la presión de poro en exceso, la cual varía durante la prueba y es medida logrando así conocer los esfuerzos efectivos.

3. **Pruebas Consolidadas-Drenadas (CD):** En esta prueba es permitido el drenaje y medido durante toda la prueba, y no existe exceso de la presión de poro durante la aplicación del esfuerzo desviador. Para la realización de esta prueba se necesitan largos tiempos en suelos de baja plasticidad para permitir su consolidación y disipación de la presión de poro en exceso desarrolladas durante la compresión.

Otro aspecto muy importante en la realización de pruebas de compresión triaxial es el Grado de Saturación del suelo (ver Capítulo II.2.1c), puesto que un suelo tiene distintos grados de saturación al ser probados en estado natural los cuales pueden estar en un estado totalmente seco hasta los saturados. Las pruebas en suelos parcialmente saturados van más allá del alcance de esta tesis, por lo cual no se hará mucho énfasis en estas.

### **I.3 Pruebas En Suelos Saturados.**

Para la realización de los ensayos de esfuerzos efectivos es importante conocer el manejo de válvulas de la cámara triaxial por lo cual a continuación se muestra un diagrama del mismo:



**Figura I.3.- Juego de válvulas para el control de esfuerzos efectivos.**

1. **Pruebas UU:** A lo largo de la prueba es impedido el drenaje del espécimen cerrando la válvula “b” (ver Figura I.3). La presión de poro del agua en la base del espécimen es medida con el transductor de presión conectado a la base de la cámara en las válvulas “c y g” (ver Figura I.3) y no permite ningún movimiento del agua del espécimen. Puesto que el agua y los granos del suelo son virtualmente incompresibles y el espécimen no tiene aire, el espécimen no sufrirá cambios volumétricos bajo los esfuerzos aplicados.

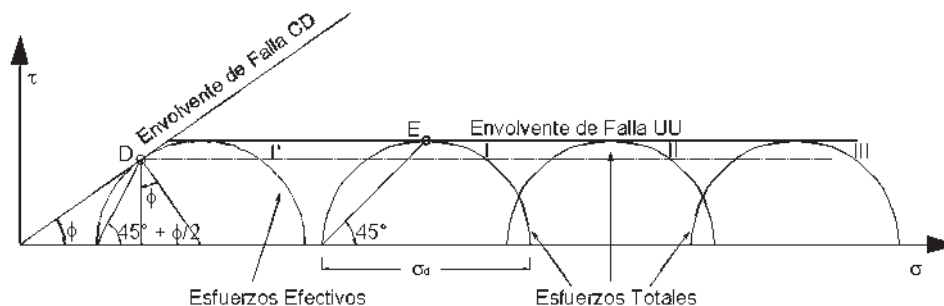
Cuando es aplicada la presión de confinamiento al espécimen el esfuerzo adicional es llevado totalmente por el agua en los vacíos, y por lo tanto los esfuerzos efectivos no varían, puesto que la presión de poro es igual al esfuerzo total; por lo tanto si se realizan varios ensayos en muestras idénticas y con distintas presiones de confinamiento los esfuerzos efectivos serán los mismos; con lo cual podemos concluir que el incremento del esfuerzo total no altera el esfuerzo efectivo. Este hecho da lugar a que al realizar la etapa de compresión se aplique un mismo esfuerzo desviador en las distintas muestras, por lo cual en una

prueba de compresión la medición de esfuerzo cortante no depende del esfuerzo total.

La medición de la presión de poro durante la compresión permite conocer los cambios debidos al incremento del esfuerzo desviador para ser medidos y graficados. En cualquier punto puede ser calculado el Coeficiente A de la presión de poro por medio de los cambios de esfuerzo desviador y presión de poro utilizando la ecuación II.15. Los valores del coeficiente A son graficados contra la deformación. El valor máximo de la falla del esfuerzo desviador es alcanzado para  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ , y la presión de poro correspondiente es denotada como  $u_f$ . Por lo tanto la ecuación II.19 queda como:

$$A = (u_f - u_0) / (\sigma_1 - \sigma_3)_f \quad (I.1)$$

En la figura I.4 se representan los círculos de Mohr para tres especímenes ensayados sometidos a esfuerzos totales (I, II y III), los cuales como puede apreciarse presentan un mismo esfuerzo desviador, pero un esfuerzo de confinamiento cada vez mayor para cada ensayo. Si se restara la presión de poro al momento de la falla de cada espécimen, solo se tendría un círculo de esfuerzos efectivos para los tres especímenes (I') y su envolvente de falla sería paralela a la de las pruebas CD, es decir, que los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna ( $c$  y  $\phi$ ) son iguales tanto para pruebas UU como CD, por lo cual una vez más puede decirse que la resistencia de un suelo depende de la fricción interna entre las partículas sólidas del mismo.



**Figura I.4.- Envolvente de falla típica para ensayos UU.**

Una vez que se han obtenido los parámetros de resistencia, se determina el esfuerzo cortante que el suelo haya soportado, para lo cual es preciso trabajar con el círculo de esfuerzos efectivos ( $\sigma'$ ) y no con los esfuerzos totales, puesto que los esfuerzos totales arrojan un esfuerzo cortante de falla de  $\sigma_d/2$  (punto E de la figura I.4), mientras que el esfuerzo cortante al cual falla el suelo es un poco menor que  $\sigma_d/2$  (punto D de la figura I.4); además en los esfuerzos totales el plano de falla está inclinado  $45^\circ$  respecto a la horizontal, mientras que el de esfuerzos efectivos está a  $45^\circ + \phi/2$  respecto a la horizontal.

2. **Pruebas Consolidadas-No Drenadas (CU):** Para permitir la consolidación durante una prueba el espécimen previamente ha sido sometido a una presión de confinamiento ( $\sigma_3$ ) y una contrapresión ( $u_0$ ) para posteriormente permitir el drenaje del agua del espécimen lo cual es logrado abriendo la línea de drenaje de la válvula “b” (ver Figura I.3) con lo cual es permitido el paso del flujo al sistema de contrapresión donde la presión es menor que la presión de poro en el espécimen. La consolidación es iniciada abriendo la válvula “b” (ver Figura I.3). El agua drena fuera del espécimen en el sistema de contrapresión hasta que la presión de poro se iguala con la contrapresión ( $u_0$ ), lo cual requiere distintos tiempos para cada tipo de suelo. Una vez que el espécimen ha sido consolidado es más denso y tieso que originalmente actuando sobre el espécimen los siguientes esfuerzos efectivos:  $\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma_3 - u_0$ .

Cuando la consolidación ha sido finalizada, la válvula “b” (ver Figura I.3) es cerrada para prevenir drenajes posteriores y la presión de confinamiento no cambia. Entonces es iniciada la etapa de compresión lentamente para permitir por lo menos la igualación del 95% de la presión de poro. Durante la compresión es medido el incremento del esfuerzo desviador ( $\Delta\sigma_d$ ) y la presión de poro ( $u_0$ ) lo cual origina una disminución en el esfuerzo efectivo. En esta etapa el volumen sigue siendo constante. El esfuerzo desviador en la falla es mayor que para las muestras no consolidadas.

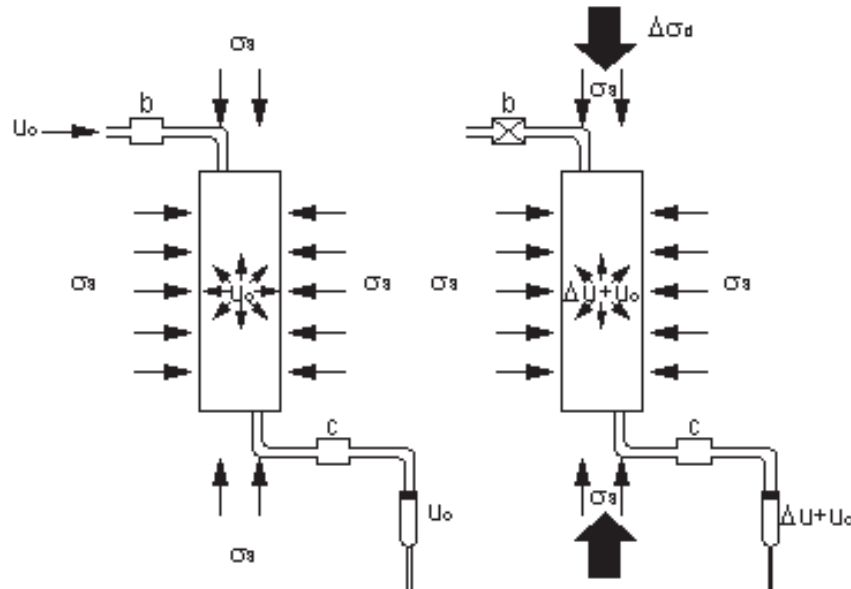
En la figura I.5 se muestra claramente lo que sucede durante la etapa de consolidación y compresión para las pruebas CU.

a) Consolidación:

- 1.- Aplicación de contrapresión ( $\sigma_3$ ) y presión de confinamiento ( $u_0$ ).
- 2.- Consolidación, medir  $\Delta v$ .
- 3.- Se alcanza  $\sigma'_3 = \sigma'_1 = \sigma_3 - u_0$

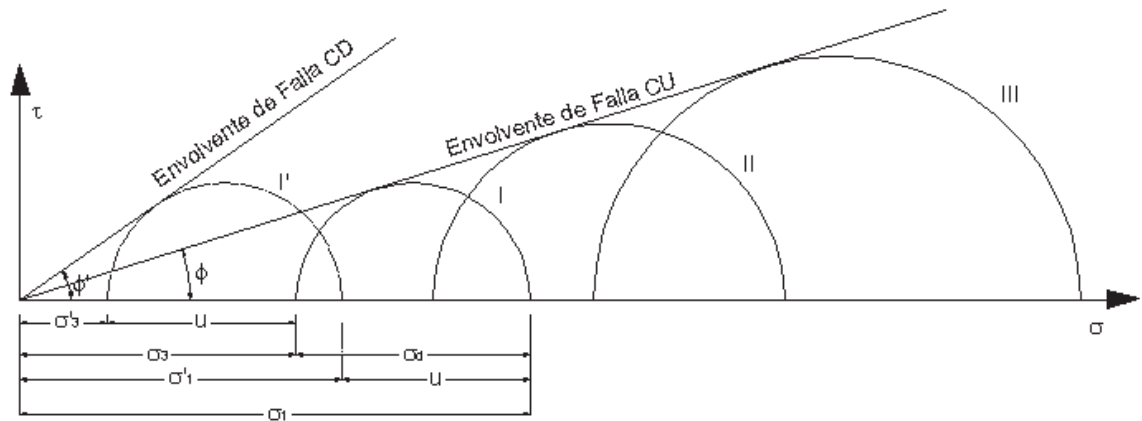
b) Compresión:

- 1.- Cerrar b.
- 2.- Mantener constante  $\sigma_3$ .
- 3.- Aplicar esfuerzo desviador ( $\Delta\sigma_d$ ).
- 4.- Medir  $\Delta\sigma_d$ ,  $\Delta u$ .



**Figura I.5.- Etapas de un ensayo CU.**

En la figura I.6 se muestran los círculos de Mohr de una prueba Consolidada-No Drenada realizada en tres especímenes con presiones de confinamiento cada vez mayores (círculos I, II y III); también aparece el círculo de esfuerzos efectivos correspondiente al círculo I. Al realizar las pruebas Consolidadas-No Drenadas es posible obtener dos envolventes de falla, una para los círculos de esfuerzos totales y otra para los de esfuerzos efectivos, para lo cual es necesario conocer la presión de poro a la cual se presenta la falla del espécimen y obtener así la diferencia de los esfuerzos totales menos dicha presión, con lo cual los círculos de esfuerzo efectivo presentaran una línea de falla paralela a la que presentan las pruebas CD.



**Figura I.6.- Envolvente de falla típica para en ensayos CU.**

Cabe mencionar que la envolvente de falla presentada por los esfuerzos totales, tan solo arroja parámetros matemáticos para calcular la resistencia del suelo a partir de los esfuerzos totales, los cuales solo son aparentes, puesto que no son los que el suelo soporta realmente en su estructura. La resistencia del suelo quedaría dada por la envolvente de esfuerzos efectivos.

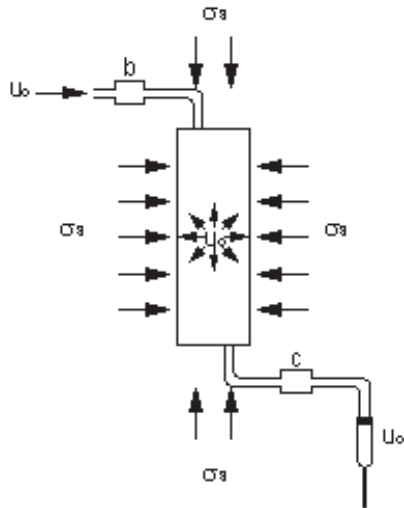
3. **Pruebas Consolidadas-Drenadas (CD):** Al igual que en las pruebas CU el suelo es consolidado por la presión de confinamiento, pero durante la etapa de compresión es permitido el drenaje dejando abierta la válvula “b” (ver Figura I.3). Una vez finalizada la consolidación se da inicio a la etapa de compresión permaneciendo constantes la presión de confinamiento ( $\sigma_3$ ) y la contrapresión ( $u_0$ ), y se aplica la carga ascendiendo el plato del marco con una velocidad de deformación muy lenta para prevenir el desarrollo de presión de poro en exceso, lo cual asegura que la presión de poro en el espécimen permanece virtualmente igual al valor inmediato de su consolidación ( $u_0$ ).

En todo el proceso es medido el incremento del esfuerzo desviador ( $\Delta\sigma_d$ ) y el cambio de volumen ( $\Delta v$ ) puesto que en la etapa de compresión a diferencia de las CU el espécimen sufre cambios volumétricos.

En la figura I.7 se muestran las etapas de consolidación y compresión para las pruebas CD.

## a) Consolidación:

- 1.- Aplicación de contrapresión ( $\sigma_3$ ) y presión de confinamiento ( $U_0$ ).
- 2.- Consolidación, medir  $\Delta v$ .
- 3.- Se alcanza  $\sigma'_3 = \sigma'_1 = \sigma_3 - U_0$



## b) Compresión:

- 1.- Mantener constante  $\sigma_3$  y  $U_0$ .
- 2.- Aplicar  $\Delta\sigma_1$  sin permitir acumulación de presión de poro en exceso ( $\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma'_1$ ).
- 3.- Medir  $\Delta\sigma_1$ ,  $\Delta U$ ,  $\Delta v$ .

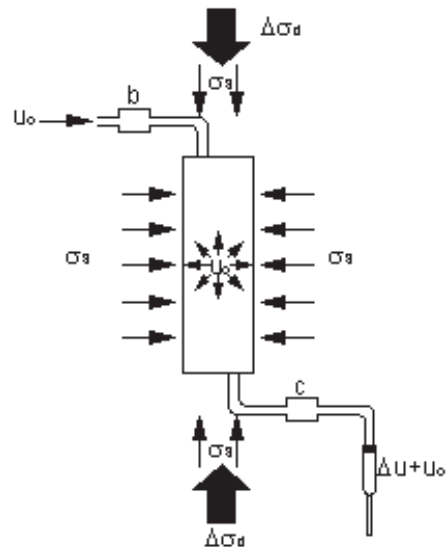


Figura I.7.- Etapas de un ensayo CD

En la realización de este tipo de pruebas es importante notar que los esfuerzos totales son iguales a los esfuerzos efectivos ( $\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma'_1$ ), esto debido a que no se permite el desarrollo de presión de poro en exceso a lo largo del ensayo, por lo cual a diferencia de las pruebas CU y UU, las CD solo tienen una envolvente de falla correspondiente a los esfuerzos efectivos como lo indica la figura I.8 la cual representa la verdadera resistencia que presenta la estructura del suelo, por lo cual todos los valores que estén por debajo de dicha línea serán estables y cualquier punto que toque dicha envolvente habrá alcanzado su falla.

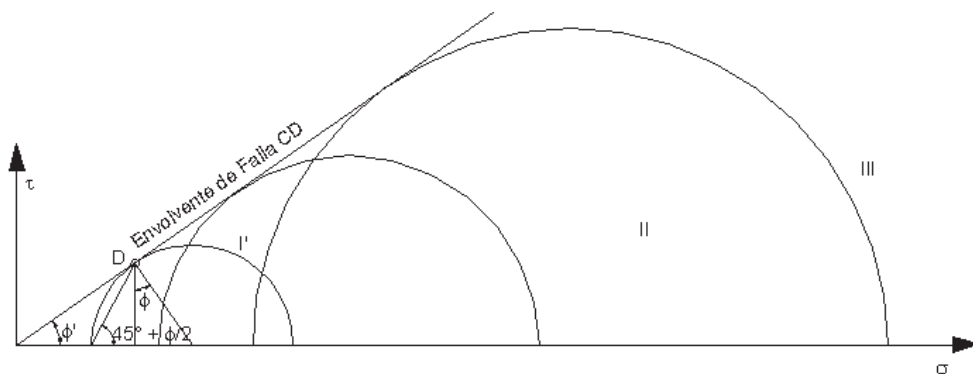


Figura I.8.- Envolvente de falla típica para en ensayos CD.

## **I.4 Saturación y Uso de la Contrapresión.**

### **I.4.1 Principios**

#### **I.4.1.1 Razón de la Saturación.**

En suelos saturados, el equipo y el procedimiento estándar para las pruebas de compresión triaxial, son fácilmente aprovechables para la medición de la presión de poro en el agua. En los parcialmente saturados se presenta la complicación de medir la presión de poro en el aire y en el agua y aunque se han realizado procedimientos satisfactorios, su complejidad no vale la pena en pruebas comerciales de rutina por lo cual no se hablara mucho sobre este tema.

Para evitar la medición de la presión de poro en la fase líquida y gaseosa del suelo, en la mayoría de las pruebas de esfuerzo efectivo se saturan las muestras como primera etapa de la prueba.

#### **I.4.1.2 Principio de la Saturación.**

La saturación de un espécimen es realizada elevando la presión de poro a un nivel lo suficientemente alto para que el agua absorba en solución todo el aire que originalmente ocupan los espacios vacíos. Para ello al mismo tiempo la presión de confinamiento es elevada manteniendo así un pequeño esfuerzo efectivo positivo en el espécimen esto con la finalidad de evitar el desmoronamiento del espécimen.

Existen varios métodos para llevar a cabo la saturación de un espécimen, de los cuales el más usado consiste en la aplicación de incrementos de contrapresión al fluido del poro, alternativamente con incrementos en la presión de confinamiento. Para lo cual, la presión de confinamiento es ligeramente mayor, que la contrapresión, para que el esfuerzo efectivo siga siendo positivo.

Una vez saturado el espécimen debe procurarse mantener en lo posible la presión de poro a la cual ha sido elevada. Puesto que la reducción de la presión de poro por abajo de los 1.5 Kg/cm<sup>2</sup> provoca que el aire disuelto salga de la solución formando burbujas, como se explica a continuación.

#### **I.4.1.3 Difusión del Aire en el Agua.**

Es importante recordar que algunos de los especímenes ensayados a compresión triaxial se encuentran en un estado parcialmente saturado (compuesto por aire y agua en sus espacios vacíos), por lo cual es necesario saturar el espécimen. El mecanismo para eliminar el aire consiste en la aplicación de presión al agua de los poros, con lo cual se provoca una difusión del aire en el agua.

La **Difusión** se define como la introducción de un cuerpo a otro con el fin de formar una mezcla homogénea, es decir, disolver homogéneamente una sustancia (sólida, líquida o gaseosa) en un líquido. La sustancia que se va a disolver es conocida como soluto y en donde se disuelva como solvente. **La capacidad con que se disuelva el soluto en el solvente** es conocida como **solubilidad** y **depende** de la naturaleza de ambos, así como de la temperatura y **presión** del sistema.

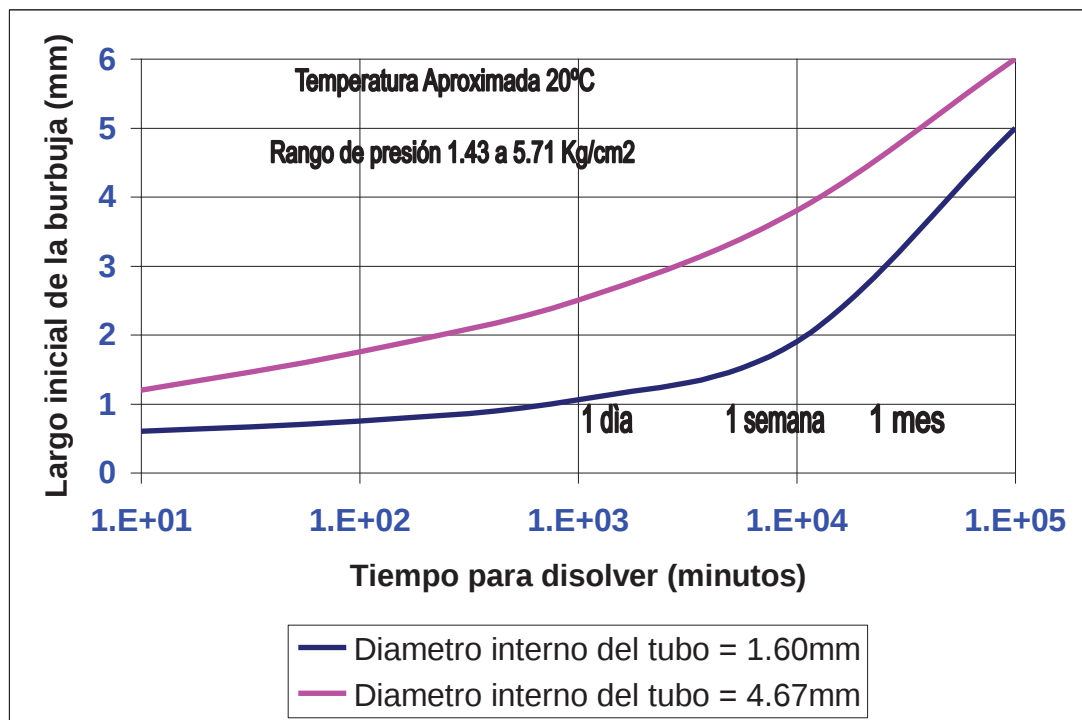
Para los gases que se disuelven en líquidos al aumentar la presión del gas en el líquido, la solubilidad del gas aumenta; por el contrario si disminuye la presión disminuye también su solubilidad. Es decir, que **la solubilidad de los gases es directamente proporcional a la presión.**

Con lo anterior podemos concluir que durante la saturación de un espécimen, el aire tiende a mezclarse homogéneamente en el agua cuando la contrapresión está siendo aplicada; con lo cual se disuelve el aire de la muestra en el agua.

Lee y Black (1972) investigaron la difusión de las burbujas dentro del agua de poro bajo la aplicación de la contrapresión. Concluyeron que el tiempo

requerido para esto depende de la longitud inicial de las burbujas, así como del diámetro de las mismas. La difusión se afecta poco para presiones del agua fuera del rango de 1.4 a 5.7 Kg/cm<sup>2</sup>.

El tiempo requerido para que se efectuó la absorción de burbujas en tubos de 2mm acorde a lo reportado por Lee y Black es mostrado en la relación gráfica de la figura I.9.



**Figura I.9.- Rapidez de difusión del aire dentro del agua bajo presión en tubos de diámetro interior pequeño.**

## **I.4.2 Solubilidad del Aire en el Agua en los Vacíos del Espécimen.**

### **I.4.2.1 Entrada de Agua del Sistema de Contrapresión.**

Cuando se introduce agua desaireada bajo presión en los vacíos de un espécimen de suelo parcialmente saturado automáticamente aumenta su grado de saturación.

El incremento teórico de la presión de poro de aire ( $\Delta u$ ) para incrementar el grado de saturación de un valor inicial a un valor final deseado esta dado por la ecuación siguiente:

$$\Delta u = p_o ((G_w - G_{wo}) (1 - H)) / (1 - G_w (1 - H)) \quad (1.2)$$

Donde:

$G_{wo}$ , es el grado de saturación inicial y  $G_w$  el final

$p_o$ , Es la presión absoluta inicial.

$H$ , Es el coeficiente de solubilidad de Henry, el cual es aproximadamente igual a 0.02 cm<sup>3</sup> de aire por cm<sup>3</sup> de agua a 20°C.

Ahora bien si la saturación final es completa, tendremos que  $G_w = 1$ , por lo cual la ecuación queda como:

$$\Delta u = p_o ((1 - G_{wo}) (1 - H)) / (1 - 1 (1 - H))$$

$$\Delta u = p_o ((1 - G_{wo}) (1 - H)) / (1 - 1 + H)$$

$$\Delta u = p_o ((1 - G_{wo}) (1 - H)) / H$$

Asumiendo  $H = 0.02$  y si la presión inicial es la atmosférica ( $p_o = 1.0335 \text{ Kg/cm}^2$ ) tendremos que:

$$\Delta u = 50.64 (1 - G_{wo}) \text{ Kg/cm}^2 \quad (1.3)$$

#### 1.4.2.2 Presurización a Contenido de Agua Constante.

Cuando el grado de saturación se incrementa elevando la presión de confinamiento, es incrementada la presión en el aire sin introducir agua adicional.

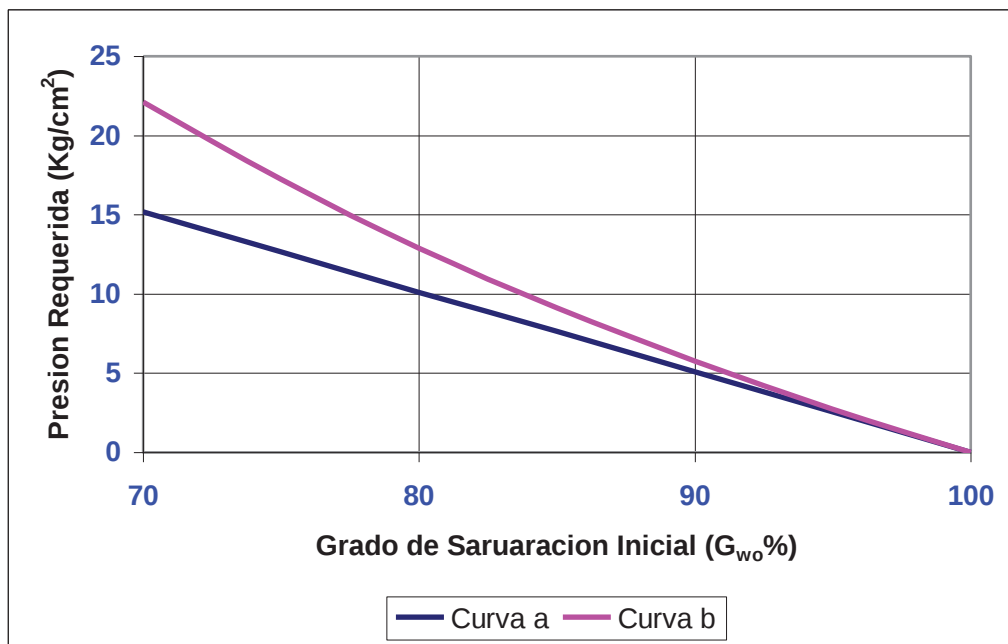
El incremento teórico de la presión de poro del aire necesario para alcanzar un grado de saturación total es dado por la ecuación citada por Bishop y Henkel:

$$\Delta u = p_o (1 - G_{wo}) / (G_{wo} H) \quad (1.4)$$

Asumiendo los valores de  $p_o$  y  $H$  mencionados anteriormente tendremos que:

$$\Delta u = 51.68 (1 - G_{wo}) / G_{wo} \text{ Kg/cm}^2 \quad (1.5)$$

En la figura I.10 se muestran las presiones requeridas para suelos parcialmente saturados, sometidos a presión de confinamiento (curva b) y a contrapresión (curva a) y son resumidos en la tabla I.1.



**Figura I.10.- Presiones requeridas para la saturación de suelos que están inicialmente parcialmente saturados: La curva (a) con contrapresión y la curva (b) con presión de confinamiento solamente.**

| Grado de Saturación Inicial ( $G_{wo}$ ) | Presión de poro teórica requerida      |                                                    |
|------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------|
|                                          | Con contrapresión ( $\text{Kg/cm}^2$ ) | Solo presión de confinamiento ( $\text{Kg/cm}^2$ ) |
| 100                                      | 0                                      | 0                                                  |
| 95                                       | 2.5475                                 | 2.72073                                            |
| 90                                       | 5.095                                  | 5.73697                                            |
| 85                                       | 7.6425                                 | 9.10986                                            |
| 80                                       | 10.0881                                | 12.90054                                           |
| 75                                       | 12.6356                                | 17.2211                                            |
| 70                                       | 15.1831                                | 22.1123                                            |

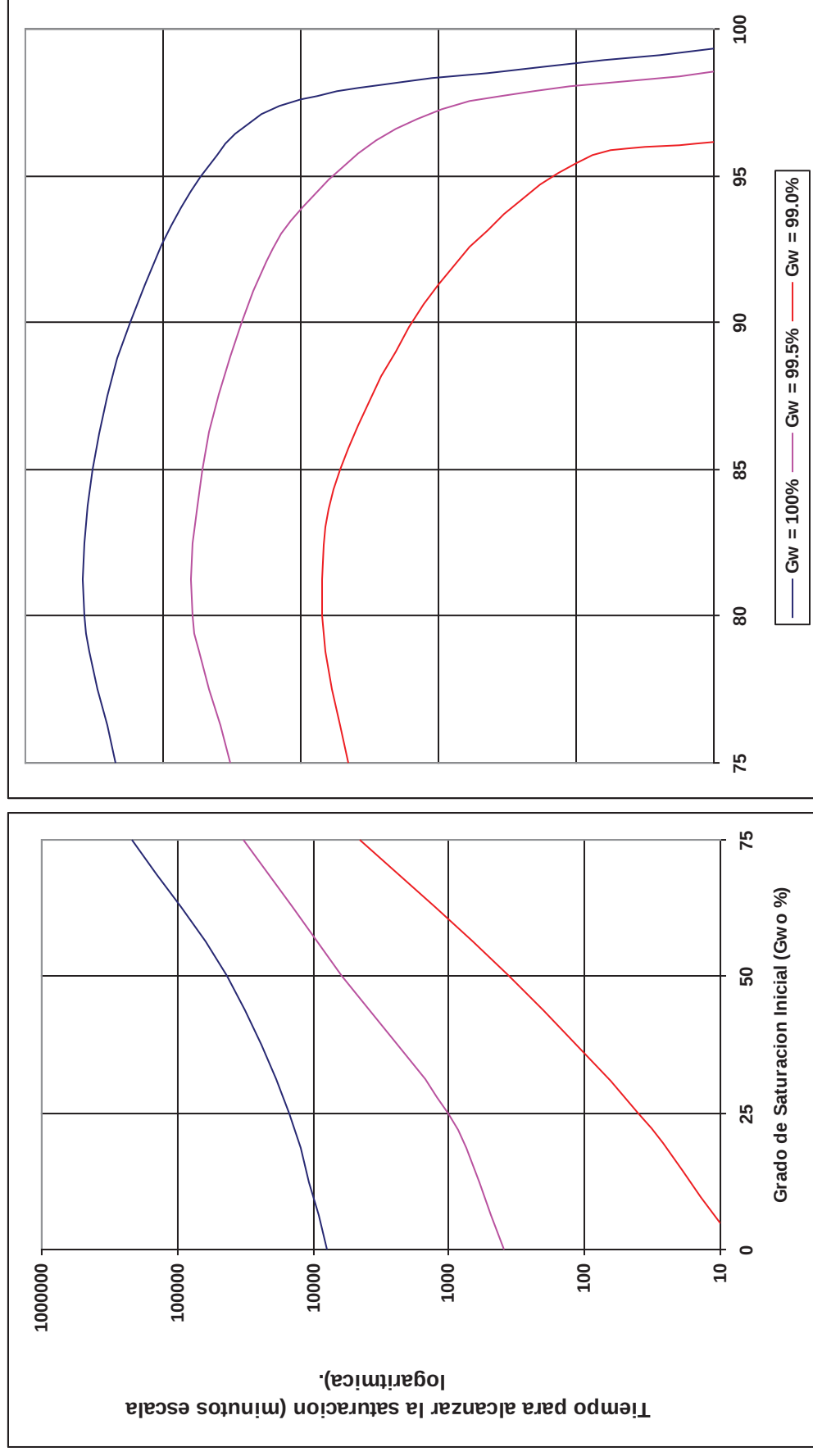
**Tabla I.1.- Presión de poro teórica para la saturación.**

### I.4.3 Presión y Tiempo Requerido Para La Saturación

Para llevar a cabo la saturación en un espécimen de suelo por medio de la aplicación de contrapresión, existen dos factores de interés, que son:

1. **La presión necesaria:** Como se mencionó anteriormente la saturación es realizada con incrementos de contrapresión alternados con incrementos de confinamiento hasta obtener un valor satisfactorio de B. Para lo cual es aceptable un valor de 0.95 como representación de la saturación total del espécimen. La presión de poro teórica requerida para la saturación total puede obtenerse basándose en la figura I.10.
2. **El tiempo requerido:** Cuando el agua es introducida a presión en los espacios vacíos del espécimen, inmediatamente se incrementa el grado de saturación del suelo debido a la compresión del aire de acuerdo a la ley de Boyle (ley de los gases ideales). Si la presión es mantenida, el grado de saturación aumenta mientras que el aire se disuelve en el agua, este proceso toma tiempo debido a la baja velocidad de difusión de las pequeñas burbujas de aire en los espacios confinados. Aquí el elemento tiempo es gobernado por la difusión y no por el efecto de la baja permeabilidad del suelo.

El tiempo requerido para la saturación bajo la contrapresión apropiada depende del grado de saturación inicial del espécimen, así como del grado final que se desea alcanzar (100% o un valor poco menor) como se indica en la figura I.11. Como puede observarse el tiempo requerido mayor se presenta cuando el grado de saturación del suelo oscila entre 75 y 85% y decrece dramáticamente cuando es mayor al 95% o cuando tiende al extremo seco.



**Figura I.1.1.- Tiempo requerido para saturación bajo adecuada contrapresión relacionado con el grado de saturación inicial**  
(Black y Lee, 1983)

## **I.4.4 Criterios de Saturación.**

### **I.4.4.1 Categorías del Suelo**

Un criterio para la saturación de los suelos es relacionarlos con el valor  $B$  (ver definición en el capítulo II.2.5.2, ecuación II.14) requerido para las propiedades del suelo en vez de usar el valor arbitrario de  $B = 0.95$ .

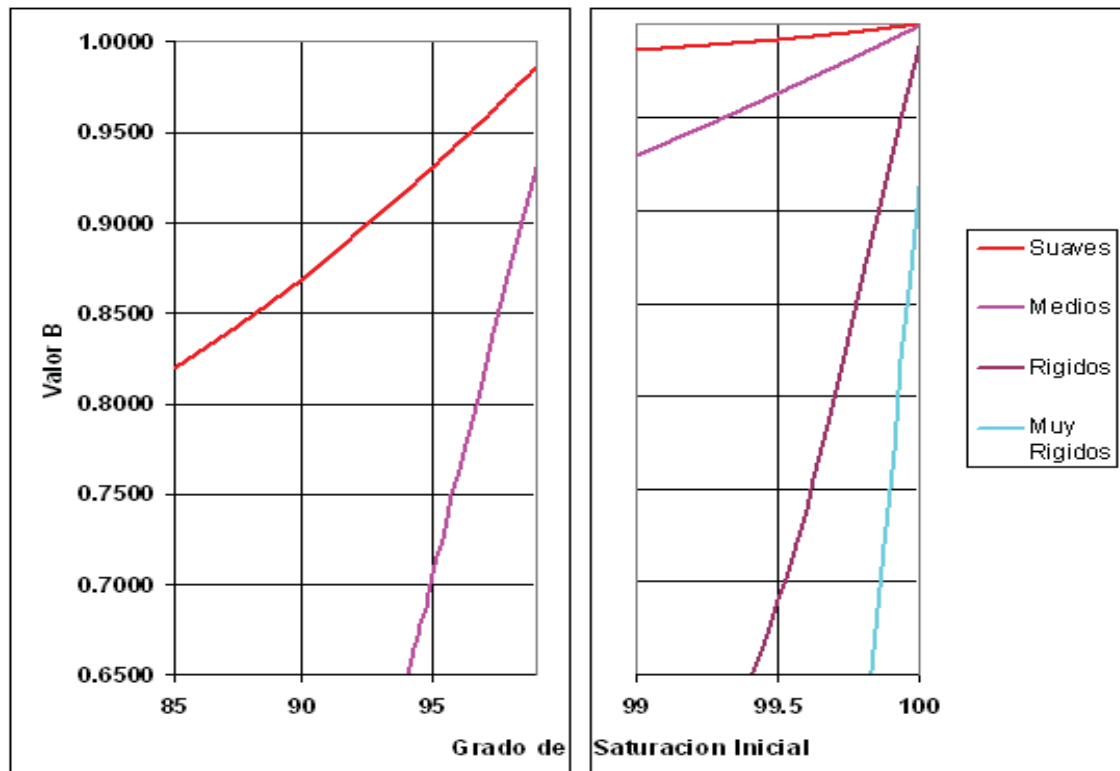
Black y Lee clasificaron los suelos en cuatro categorías para el estudio de los efectos de saturación los cuales son:

- Suelos Suaves:  
Arcillas normalmente consolidadas.
- Suelos Medios:  
Arcillas ligeramente consolidadas.  
Arcillas y Limos compactados.
- Suelos Rígidos:  
Arcillas rígidas preconsolidadas.  
Arenas medias.
- Suelos muy Rígidos:  
Arcillas muy rígidas.  
Arenas muy densas.  
Suelos consolidados a un esfuerzo efectivo muy alto.  
Arcillas compactadas con una estructura rígida.  
Suelos con un agente cementante.

Valores típicos de  $B$  son mostrados gráficamente para grados de saturación inicial de 85 a 100% en la figura I.12 y son resumidos en la tabla I.2.

| Categorías del Suelo | Grado de Saturación |        |        |
|----------------------|---------------------|--------|--------|
|                      | 100%                | 95.50% | 99.00% |
| <b>Suaves</b>        | 0.9998              | 0.9920 | 0.9860 |
| <b>Medios</b>        | 0.9988              | 0.9630 | 0.9300 |
| <b>Rígidos</b>       | 0.9877              | 0.6900 | 0.5100 |
| <b>Muy Rígidos</b>   | 0.9130              | 0.2000 | 0.1000 |

**Tabla I.2.- Valores típicos de B para suelos cercanos a su saturación.**

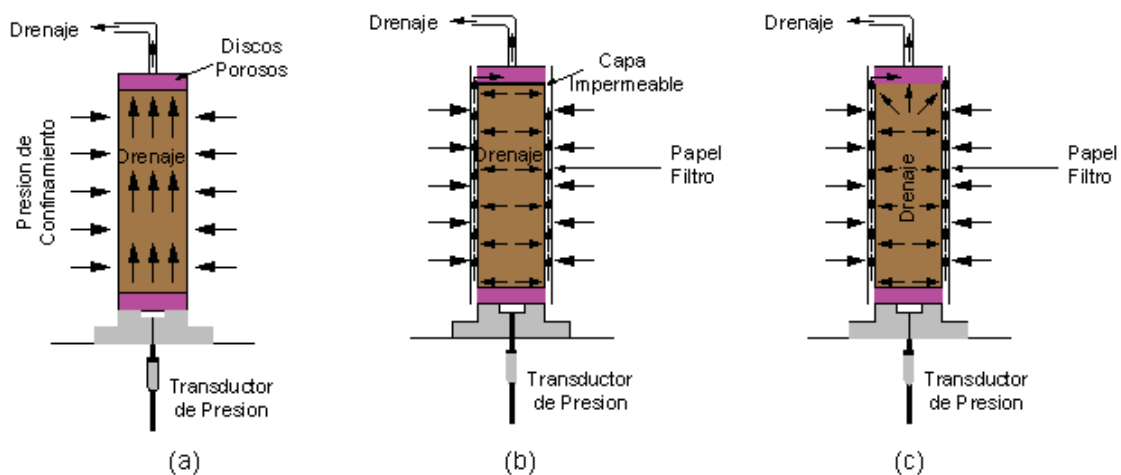


**Figura I.12.- Valores típicos del coeficiente de presión de poro B relacionado al grado de saturación y rigidez de los suelos.**

## **I.5 Consolidación Triaxial.**

La consolidación es la segunda etapa de la prueba, es decir que una vez saturado el espécimen se prosigue con la consolidación del mismo. Esto con la finalidad de asegurar la saturación total del espécimen con un valor del coeficiente B cercano a la unidad. La consolidación de un espécimen saturado se realiza en la cámara de compresión triaxial antes de aplicar el esfuerzo desviador.

Durante la consolidación en la cámara triaxial, la presión aplicada es igual en todas las caras del espécimen. El drenaje del exceso de poro del agua ocurre generalmente por la zona superior del espécimen (Figura I.13a). La velocidad de consolidación para suelos de baja permeabilidad puede aumentar colocando a los costados papel filtro y una capa impermeable en el cabezal del espécimen con lo cual el drenaje tiende a fluir por el límite radial del espécimen (Figura I.13b). Usualmente la capa impermeable del cabezal es omitida para que el drenaje tome lugar por el límite radial y el cabezal del espécimen (Figura I.13c). La medición de la presión de poro es usualmente en la base, por lo cual es una superficie no drenada.

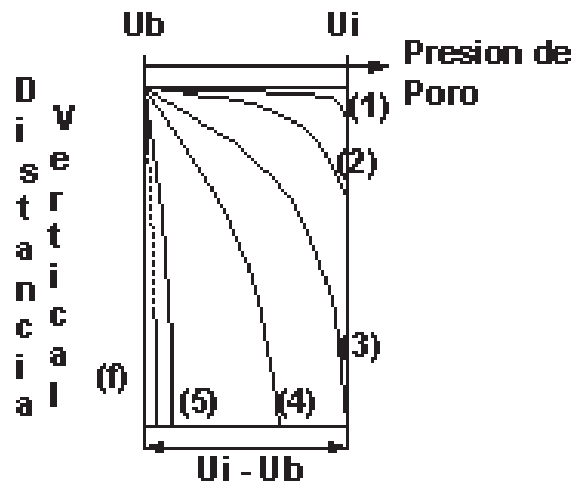


**Figura I.13.- Consolidación de una muestra sometida a compresión triaxial. (a) Drenaje por el cabezal del espécimen. (b) Drenaje por el límite radial del espécimen. (c) Drenaje por el límite radial y el cabezal del espécimen.**

### I.5.1 Distribución De la Presión de Poro.

Un espécimen de suelo inmediatamente antes de la consolidación bajo la presión de confinamiento  $\sigma_3$ , es  $u_i$ , y es uniforme a lo largo del espécimen. En la tubería antes de llegar a la válvula b, (la cual es mantenida cerrada), se mantiene la presión constante  $u_b$ , la cual es menor que  $u_i$ .

La consolidación del espécimen es iniciada abriendo la válvula b y casi inmediatamente la presión en exceso ( $u_i - u_b$ ) en el cabezal poroso baja casi al valor de  $u_b$ . La distribución de la presión de poro a través de una sección vertical del espécimen es indicado por la curva 1 en la figura I.14d. Debido a la permeabilidad el agua drena fuera del espécimen poco a poco, las distribuciones de presión sucesivas son representadas por las curvas 2, 3, 4 y 5. La condición final es lograda cuando tenemos una presión de poro uniforme la cual tiende a ser igual a  $u_b$  puesto que nunca se alcanzara la igualación completa (curva f), pero un pequeño residuo del 5% de la presión de poro disipada es aceptable para el fin de la consolidación, lo cual representa el 95% de la disipación de la presión de poro en exceso.



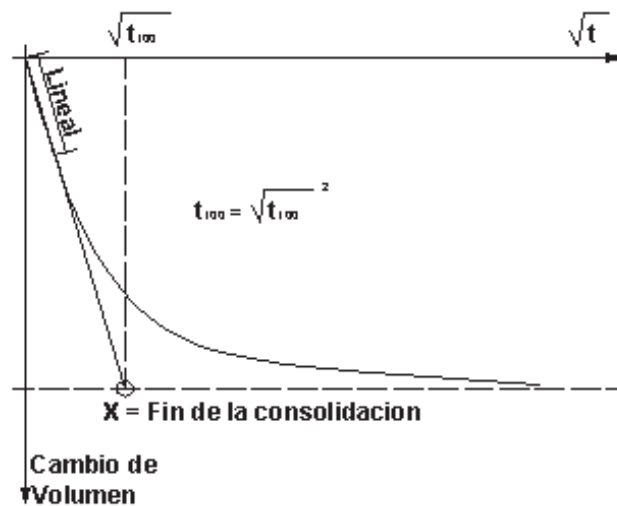
**Figura I.14d. Distribución de la presión de poro a través de una sección vertical del espécimen.**

## **I.6 Tiempo de Falla en Pruebas de Compresión.**

### **I.6.1 Cálculo del Coeficiente de Consolidación ( $c_v$ ).**

Para poder realizar una estimación del tiempo de falla es necesario determinar el coeficiente de consolidación ( $C_{vi}$ ), para lo cual primeramente es obtenido el tiempo de la consolidación del espécimen al 100% como se menciona a continuación:

El volumen de agua drenado fuera del espécimen durante la consolidación es registrado y se traza contra la raíz cuadrada del tiempo en minutos (Figura I.15). La parte inicial de esta grafica hasta el 50% es aproximadamente lineal para las condiciones drenadas. La línea recta es prolongada hasta interceptar con la línea horizontal que representa el 100% de la consolidación, con lo cual es encontrado el punto X que representa el fin de la consolidación. El final de la consolidación debe presentar por lo menos el 95% de la disipación de la presión de poro en exceso. En "X" el valor de lectura dado es la raíz cuadrada del tiempo al 100% de su consolidación, por lo cual es multiplicado por si mismo para obtener el tiempo teórico de la consolidación total del espécimen.



**Figura I.15.- Derivación del tiempo teórico ( $t_{100}$ ) en función de la grafica Volumen vs. Tiempo.**

Para el cálculo de  $C_{vi}$  se utiliza la ecuación siguiente:

$$C_{vi} = \pi D^2 / \lambda t_{100} \text{ (m}^2\text{/año)}$$

Generalmente el diámetro del espécimen ( $D$ ) esta expresado en mm y el tiempo en minutos ( $t_{100}$ ), por lo que la ecuación queda expresada como:

$$C_{vi} = \pi (D/1000)^2 / \lambda (t_{100} / (60 \times 24 \times 365.2)) \text{ (m}^2\text{/año)}$$

$$C_{vi} = 1.652 \pi D^2 / \lambda t_{100} \text{ (m}^2\text{/año)} \quad (1.6)$$

En la tabla I.3 son dados los valores de  $\lambda$  para cinco condiciones diferentes de drenaje, en función de su relación L/D (denotada por r) y para especímenes cuya relación es de dos ( $r = 2$ ).

| Condiciones de Drenaje Durante la Consolidación | Valores de $\eta$ | Valores de $\lambda$ |               | Valores de F (para $r = 2$ ) |                   |
|-------------------------------------------------|-------------------|----------------------|---------------|------------------------------|-------------------|
|                                                 |                   | L/D = 2              | L/D = r       | Prueba Drenada               | Prueba No Drenada |
| De un Extremo                                   | 0.75              | 1                    | $r^2/4$       | <b>8.50</b>                  | <b>0.53</b>       |
| Con ambos Extremos                              | 3.00              | 4                    | $r^2/4$       | 8.50                         | 2.10              |
| Tan solo limite radial                          | 32.00             | 64                   | 64            | 12.70                        | 1.43              |
| Limite radial y un Extremo                      | 36.00             | 80                   | $3.2(1+2r)^2$ | 14.20                        | 1.80              |
| Limite radia y ambos Extremos                   | 40.40             | 100                  | $4(1+2r)^2$   | 15.80                        | 2.30              |

**Tabla I.3.- Valores de  $\lambda$  para diferentes condiciones de drenaje.**

### **I.6.2 Disipación de la Presión De Poro en Exceso Durante la Compresión.**

En una prueba de compresión triaxial sobre un suelo saturado, la presión de poro en exceso es provocada por el incremento del esfuerzo desviador acorde a la ecuación II.15 (ver capítulo II). Durante el ensaye de una prueba CD la aplicación del esfuerzo desviador debe ser lo suficientemente lenta para permitir la disipación de la presión de poro en exceso, por medio del drenaje antes de alcanzar su falla. En una prueba CU donde la presión de poro en exceso es permitida, se debe dar un tiempo suficiente para permitir la igualación de esta presión a lo largo del espécimen. A continuación se mencionan estos efectos del tiempo.

La teoría de consolidación fue aplicada al problema de la disipación de la presión de poro en exceso en pruebas de compresión triaxial por Gilbert y Henkel (1954). Ellos mostraron que el grado medio de disipación en la falla puede expresarse como:

$$U_f/100 = 1 - L^2 / 4\eta c_{vi} t_f \quad (1.7)$$

Donde:

L: longitud del espécimen.

$c_{vi}$ , es el coeficiente de consolidación (ecuación 1.6).

$t_f$ : Tiempo de falla.

$\eta$ : Factor dependiente de las condiciones de drenaje (Tabla I.3).

### I.6.3 Tiempo de Falla en Pruebas Drenadas

Un grado teórico del 95% de disipación de la presión de poro en exceso es aceptable para determinar los parámetros de esfuerzo drenado. Poniendo  $U_f = 95\%$  en la ecuación 1.7 y despejando el tiempo tendremos que:

$$t_f = L^2 / 0.2\eta c_{vi} \quad (1.8)$$

Ahora bien si combinamos la ecuación del tiempo de falla (1.8) con la del coeficiente de consolidación (1.6) tendremos:

$$t_f = (5r^2 \lambda / \pi \eta) t_{100} \quad (1.9)$$

Para especímenes cuya relación es de 2 se tiene que:

$$t_f = (20\lambda / \pi \eta) t_{100} \quad (1.10)$$

Los valores para  $t_f$  son dados en la tabla I.3 y son denotados por F. Para otras relaciones puede calcularse el factor con la ecuación I.9.

### I.6.4 Tiempo de Falla en Pruebas No Drenadas

El tiempo requerido para la falla en pruebas no drenadas, basados en el 95% de la igualación de presión de poro en el espécimen, fue dado por Blight (1964). La relación entre el  $t_f$  y  $c_{vi}$  depende de la presencia o ausencia de drenes laterales.

Para pruebas sin drenes laterales (Figura I.13a), su ecuación es:

$$t_f = 16H^2 / c_{vi} \quad (1.11)$$

Donde:

$$H = L / 2$$

Por lo tanto:

$$t_f = 0.4L^2 / c_{vi}$$

Sustituyendo  $c_{vi}$  (ecuación 1.6):

$$t_f = 0.4 L^2 \lambda t_{100} / \pi D^2$$

Ahora bien si  $L/D = r$ :

$$t_f = 0.127 r^2 \lambda t_{100}$$

Para drenes con una terminal  $\lambda = r^2 / 4$  (Tabla I.3) por lo cual:

$$t_f = 0.0318 r^4 t_{100} \quad (1.12)$$

Para especímenes cuya relación es 2, tendremos que:

$$t_f = 0.508 t_{100} \quad (1.13)$$

Si existe la presencia de drenes laterales, donde el drenaje ocurre por el límite radial en la etapa de consolidación (Figura I.13b), las relaciones son las siguientes:

$$t_f = 0.0175L^2/c_{vi} \quad (1.14)$$

Sustituyendo  $c_{vi}$  (ecuación I.6):

$$t_f = 0.0175 L^2 \lambda t_{100} / \pi D^2$$

Ahora bien si  $L/D = r$  y  $\lambda = 64$  (tabla I.3):

$$t_f = 0.0175 r^2 \times 64 t_{100} / \pi$$

Es decir

$$t_f = 0.3565 r^2 t_{100} \quad (1.15)$$

Si  $r = 2$ , tendremos que:

$$t_f = 1.43 t_{100} \quad (1.16)$$

Si además del dren lateral existe el drenaje por una terminal (Figura I.13c), el factor aumenta en proporción al valor de  $\lambda$ , dando los valores de F mostrados en la tabla I.3.

Todos los valores del tiempo de falla para  $t_{100}$  son dados en la tabla I.3 para especímenes cuya altura es igual a dos veces el diámetro ( $r = 2$ ). Para otros valores pueden utilizarse las ecuaciones I.12 para ensayos sin drenes laterales y I.15 para ensayos con drenes laterales, donde  $L/D = r$  y  $\lambda$ , esta en función de si se aumenta o no el dren por la terminal superior del espécimen.

An aerial photograph of a hillside with a rainbow visible in the sky. The hillside is covered in dense vegetation, and a small town or village is visible at the base of the hill. The rainbow is positioned in the upper right portion of the image, arching over the hillside.

## **Capitulo II**

### **Pruebas de Esfuerzo Efectivo- Principios, Teoria y Aplicaciones**

#### **II.1 Introducción.**

##### **II.1.1 Historia.**

#### **II.2. Principios de Esfuerzo Efectivo.**

##### **II.2.1 Componentes Del Suelo.**

##### **II.2.2 Transmisión del Esfuerzo Normal en Suelo Saturado.**

##### **II.2.3 Compresibilidad.**

##### **II.2.4 Transmisión de Esfuerzos Cortantes en un Suelo Saturado.**

##### **II.2.5 Coeficientes de Presión de Poro en Suelos Saturados.**

###### **II.2.5.1 Cambios de Esfuerzo Total y de Presión de Poro.**

###### **II.2.5.2 Coeficiente B en Suelos Saturados.**

###### **II.2.5.3 Coeficiente A en Suelos Saturados.**

###### **II.2.5.4 Ecuación General de la Presión de Poro.**

##### **II.2.6 Coeficientes de Presión de Poro en Suelos Parcialmente Saturados.**

#### **II.3. Aplicación de Pruebas Triaxiales.**

## Capítulo II

### Pruebas de Esfuerzo Efectivo – Principios, Teoría y Aplicaciones.

#### II.1 Introducción.

##### II.1.1 Historia.

El Principio de Esfuerzo Efectivo fue aplicado por primera vez por Terzaghi cerca del año 1920. El se dio cuenta que el Esfuerzo Total Normal para cualquier plano era compartido entre la estructura del grano y la presión del agua en los poros. El esfuerzo efectivo fue definido como la diferencia entre el esfuerzo total y la presión del agua en los espacios vacíos, mejor conocida como presión de poro del agua. Terzaghi encontró que las propiedades mecánicas del suelo son controladas directamente por el esfuerzo efectivo, es decir se relacionan directamente con la fase sólida del suelo.

En el año de 1936 Terzaghi publicó de manera clara el principio de esfuerzo efectivo y su importancia:

1. El esfuerzo en cualquier punto de una masa de suelo puede calcularse con los esfuerzos totales ( $\sigma$ ). Si los vacíos del suelo son llenos de agua bajo un esfuerzo ( $u$ ), el esfuerzo total principal constara de dos partes. Una parte actúa en el agua ( $u$ ) y el sólido en cualquier dirección con la misma magnitud y es conocida como “esfuerzo neutral” (presión de poro). El equilibrio  $\sigma' = \sigma - u$  representa la otra parte del esfuerzo total y tiene su asiento en la fase sólida del suelo y es conocida como “esfuerzo principal efectivo”.
2. Todos los efectos originados a los cambios de esfuerzos (compresión, distorsión y esfuerzo cortante) son debidos principalmente a los cambios de esfuerzo efectivo.

En los años 1921 a 1925 Terzaghi realizó y publicó resultados de pruebas “Consolidadas-No drenadas” normalmente consolidadas, en las cuales obtuvo valores del “Angulo de fricción interna efectivo ( $\phi'$ )”, y en el año de 1933 realizó las primeras pruebas triaxiales drenadas y no drenadas con medición de presión de poro.

Posteriormente en el año de 1950 fueron realizadas algunas pruebas con medición de presión de poro sobre arenas saturadas en Gran Bretaña en el “Imperial College” reportadas por Bishop y Eldin, seguidas por pruebas en muestras de arcilla. Muchos progresos en el análisis y diseño de equipos de prueba fueron hechos por el Imperial College a partir de esas fechas. Siguiendo con la publicación de “La Medida de las Propiedades del Suelo en Pruebas Triaxiales” (Bishop y Henkel, 1957), con lo cual la prueba de esfuerzo efectivo comenzó a ser utilizada como procedimiento estándar en laboratorios comerciales.

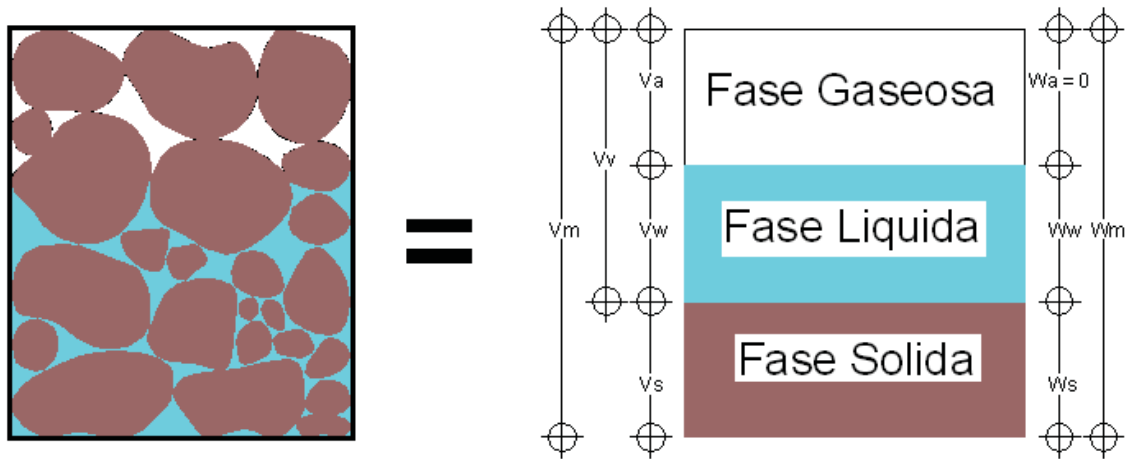
Hoy gran parte de laboratorios importantes son equipados para realizar Pruebas de Esfuerzo Efectivo.

## **II.2. Principios de Esfuerzo Efectivo.**

### **II.2.1 Componentes Del Suelo**

Suelo es cualquier depósito natural que se encuentra formando parte de la corteza terrestre, el cual consta de un conjunto de partículas discretas, junto con cantidades variables de agua y gas (generalmente aire), acorde a lo cual el suelo esta constituido por tres fases: la sólida, la líquida y la gaseosa (Figura II.1). El conjunto de estas tres fases forman el volumen de la muestra ( $V_m$ ) y el peso de ambas es conocido como el peso de la muestra ( $W_m$ ). Las partículas sólidas están en contacto unas con otras formando una estructura esquelética no cementada formando así el volumen de sólidos de la muestra ( $V_s$ ) cuyo peso es denominado como el peso de los sólidos ( $W_s$ ) y los espacios entre ellas forman poros, los cuales contienen aire y/o agua los cuales dan origen al volumen de aire ( $V_a$ ) y volumen de agua ( $V_a$ ) sucesivamente los cuales en

conjunto comprenden el volumen de vacíos ( $V_v$ ). El peso del agua es denotado como  $W_w$  y el peso del aire como  $W_a$ , el cual es convencionalmente considerado como nulo en Mecánica de Suelos.



**Figura II.1.- Esquema de una muestra de suelo en la que se muestran la tres fases del suelo y sus volúmenes y pesos respectivos.**

Una vez enunciadas las fases que conforman un suelo es importante conocer algunas relaciones las cuales son mencionadas a continuación con la finalidad de comprender mejor las propiedades mecánicas de los suelos.

- a) **Relación de Vacíos ( $e$ ):** Es el cociente que resulta de dividir el volumen de vacíos entre el volumen de sólidos de una muestra de suelo.

$$e = V_v / V_s \quad (II.1)$$

- b) **Porosidad ( $n$ ):** Es el porcentaje espacios vacíos que tiene una muestra de suelo y es denotado por la ecuación:

$$n = 100 V_v / V_m \quad (II.2)$$

- c) **Grado de Saturación ( $G_w$ ):** El grado de saturación mide el porcentaje de vacíos que están llenos de agua, es decir:

$$G_w = 100 V_w / V_v \quad (II.3)$$

Dependiendo del grado de saturación que contengan los suelos estos pueden clasificarse de tres formas:

- **Suelos Secos:** estos se forman cuando los vacíos están completamente llenos de aire ( $G_w = 0$ ).
- **Suelos Parcialmente Saturados:** son aquellos en que los vacíos están formados por aire y agua ( $0 < G_w < 100$ ).
- **Suelos Saturados:** son aquellos en los cuales los espacios vacíos quedan llenos en su totalidad por agua ( $G_w = 100$ ).

d) **Contenido de Humedad ( $w$ ):** Es definido como por la relación entre el peso del agua y el peso de sólidos que contiene una muestra, como lo expresa la ecuación:

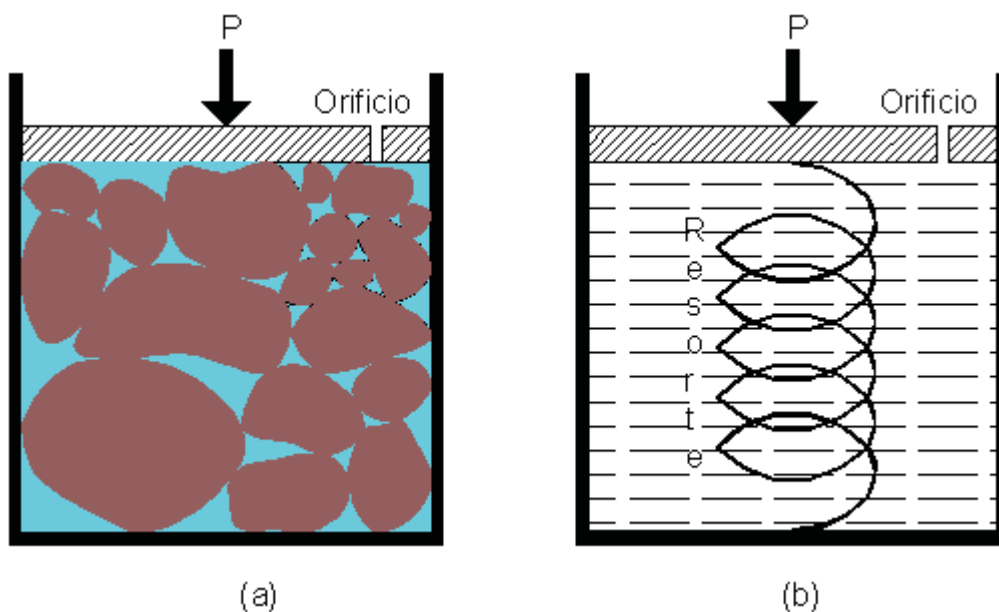
$$w = 100 W_w / W_s \quad (II.4)$$

## II.2.2 Transmisión del Esfuerzo Normal en Suelo Saturado.

Cuando un suelo está saturado y se encuentra en equilibrio bajo una carga de esfuerzo total aplicado, este esfuerzo es compartido entre sus puntos de contacto de las partículas y la presión de poro del agua. Para entender mejor como son soportados los esfuerzos por un suelo al ser sometido a una carga, considérese una carga  $P$  uniformemente distribuida sobre una placa de área  $A$ , la cual es apoyada sobre un conjunto de partículas minerales de forma irregular, las cuales a su vez forman vacíos entre ellas (Figura II.2a). La relación de la carga aplicada entre la superficie de la placa ( $P/A$ ) es conocida como esfuerzo total ( $\sigma$ ).

Si los vacíos son llenos de agua, la distribución de la carga es llevada por la estructura sólida y la fase líquida del suelo, como se menciona en el párrafo anterior, para ejemplificar de manera mas clara este concepto en la figura II.2b

se ha representado una cámara sometida a un esfuerzo  $\sigma$ , el cual es soportado por un resorte y agua los cuales simulan la estructura sólida y la fase líquida del suelo sucesivamente. Si se aplica una carga sobre la placa y el orificio de la placa permanece cerrado puede observarse que el resorte no se deforma por lo cual el esfuerzo es soportado totalmente por el agua, esto debido a su incompresibilidad del agua, de igual manera al someter un suelo a una carga, si este no le permite salir al agua, la fase sólida no sufrirá ninguna deformación ni ejercerá esfuerzo alguno, sin embargo el agua tomara en su totalidad el esfuerzo el cual es conocido como presión de poro del agua ( $u_w$ ).



**Figura II.2.- Distribución de los efectos de una carga exterior en una masa de suelo.**

Pero si se permite que el fluido salga por el orificio abriendo la válvula, puede observarse que el resorte iniciara una deformación existiendo una transferencia del esfuerzo del agua al resorte, esto debido a que el agua tiende a buscar una zona con una presión menor, por lo tanto tiende a fluir fuera, lo mismo ocurre con un suelo al aplicarle una carga, en el primer momento el agua soportara totalmente la carga, generándose una presión en exceso hidrostática y debido a que no existe algo que le impida el drenaje, esta tiende a fluir a zonas con una presión hidrostática menor, con lo cual la estructura sólida del suelo sufre un reacomodo de partículas comprimiéndose y tomando con ello el esfuerzo

del agua que va drenándose, este esfuerzo que adquiere la estructura sólida es conocido como esfuerzo efectivo ( $\sigma'$ ). La velocidad de transferencia depende del tamaño del orificio, el cual representa la permeabilidad del suelo. Es evidente que si se da un tiempo suficiente para que el resorte tenga una deformación demasiado grande, se lograra que el resorte soporte totalmente el esfuerzo al cual se ha sometido, de igual manera el suelo con el paso del tiempo sufre una disipación de la presión de poro hasta que la estructura sólida toma de manera total el esfuerzo al cual es sometido, volviendo el fluido a sus condiciones iniciales.

Con lo anterior puede comprobarse que al someter a un suelo saturado a un esfuerzo, este será soportado por el agua y la estructura sólida, tomando primeramente el agua este esfuerzo hasta que logre disiparse por la permeabilidad del suelo, lo cual provocara poco a poco una transmisión del esfuerzo del agua a la estructura sólida, por lo tanto puede concluirse que el esfuerzo total esta definido por la ecuación:

$$\sigma = \sigma' + u_w \quad (II.5)$$

Donde:

$\sigma$  = Esfuerzo total aplicado al suelo.

$\sigma'$  = Es la parte del esfuerzo total tomada por la fase sólida y es denominada como esfuerzo efectivo.

$u_w$  = Es la presión a la cual esta sometida el agua en los vacíos ( $u_w < \sigma$ ), la cual actúa igual en todas sus direcciones.

Por lo tanto el esfuerzo efectivo es definido por:

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (II.6)$$

Esta ecuación es la más importante en la mecánica de suelos.

Es importante mencionar que si el esfuerzo efectivo aumenta, las partículas sólidas del suelo se presionan unas contra otras para llegar a estructuras más compactas; en cambio el mismo aumento del esfuerzo total con la presión de poro no tendrá ningún efecto en el acomodo de las partículas.

El esfuerzo efectivo es definido algunas veces igual al esfuerzo íntergranular, es decir el esfuerzo entre las partículas sólidas (este valor es solo aproximado).

### II.2.3 Compresibilidad

La compresibilidad es el inverso del modulo de elasticidad, con lo cual se refleja la cantidad de deformación de un volumen de material poroso cuando es afectado por un esfuerzo. Aunque en un suelo existen varios tipos de compresibilidad, uno para la fase sólida del suelo y otro para los espacios vacíos del suelo (aire y/o agua), la primera es despreciable puesto que los granos sólidos son prácticamente incompresibles. La compresibilidad de los espacios vacíos, se define como el porcentaje del cambio en el volumen total del suelo ( $\Delta V/V$ ) dividido por el cambio en el esfuerzo efectivo que causa la deformación, es decir:

$$\Delta V/V = -C_s \Delta \sigma' \quad (II.7)$$

Donde:

$\Delta V$ : Cambio de volumen en el espécimen.

$V$ : Volumen inicial del espécimen.

$C_s$ : Coeficiente de compresibilidad volumétrica

$\Delta \sigma'$ : Cambio de esfuerzo efectivo.

Y el signo menos indica que por cada incremento de esfuerzo existe una disminución en el volumen.

El cambio de volumen en un suelo sometido a esfuerzos normales está dado por los cambios de esfuerzo efectivo, no de los esfuerzos totales. Esto debido a

que puede permanecer constante el esfuerzo total, pero variar la presión de poro debido al drenaje en la prueba (en la figura II.2b puede explicarse claramente que para que ocurra un esfuerzo, primeramente tiene que ocurrir un cambio de volumen en el agua).

En la tabla II.1 se muestran las compresibilidades volumétricas relativas a la estructura del suelo, granos sólidos y agua. Para propósitos prácticos el agua y las partículas sólidas se consideran incompresibles.

| Material             | Compresibilidad Volumétrica |                  |
|----------------------|-----------------------------|------------------|
|                      | M <sup>2</sup> /Kg          | Relativo al Agua |
| Partículas del suelo | $1.47-2.94 \times 10^{-10}$ | 0.03-0.06        |
| Agua                 | $4.90 \times 10^{-9}$       | 1                |
| Suelos:              |                             |                  |
| Baja compresibilidad | $4.90 \times 10^{-7}$       | 100              |
| Alta compresibilidad | $1.47 \times 10^{-5}$       | 3000             |

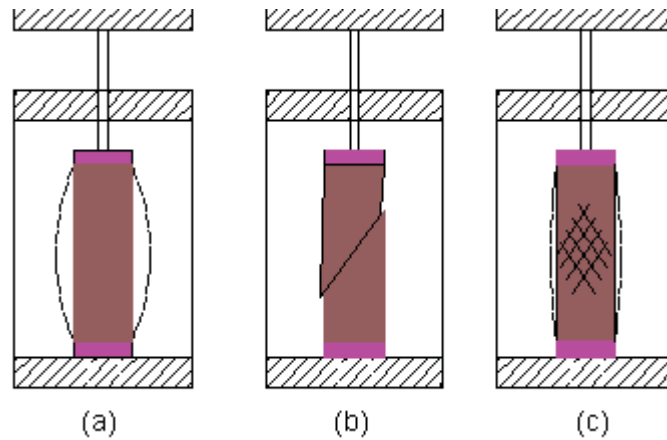
**Tabla II.1.- Compresibilidades volumétricas aproximadas.**

#### **II.2.4 Transmisión de Esfuerzos Cortantes en un Suelo Saturado.**

Cuando un suelo es sometido a una carga, presenta una resistencia a la deformación, pero cuando se sobrepasa la resistencia máxima del suelo, da origen a un desplazamiento de las partículas del suelo a lo largo de una superficie de ruptura, generando así la falla del suelo. Existen tres formas de falla comunes:

- **Falla Plástica:** El espécimen tiende a tomar una forma convexa (forma de barril) y no presenta agrietamientos (Fig. II.3a).
- **Falla Frágil:** El espécimen se corta a lo largo de una o más superficies bien definidas (Fig. II.3b).

- **Falla Semiplástica:** Presenta una combinación de las dos anteriores (Fig. II.3c).



**Figura II.3.- Modos de falla de pruebas de compresión: a) Plástica, b) Frágil y c) Semiplástica.**

Para la obtención de la resistencia al esfuerzo cortante es necesario obtener los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna ( $c$  y  $\phi$ ) **con la envolvente de Mohr-Coulomb** los cuales pueden ser relacionados con los esfuerzos totales o efectivos, por medio de la ecuación de Coulomb:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (II.8)$$

Ahora bien debido a que los esfuerzos cortantes en un suelo son soportados enteramente por el esqueleto del suelo (debido a que los fluidos no proporcionan resistencia a los esfuerzos cortantes), la resistencia al esfuerzo cortante de un plano depende del esfuerzo efectivo normal a ese plano para lo cual la ecuación de Coulomb fue modificada por Terzaghi a términos de esfuerzo efectivo:

$$\tau_f' = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (II.9)$$

Donde:

$\tau_f'$  = Esfuerzo Cortante en el Plano (en términos de esfuerzo efectivo)

$\sigma'$  = Esfuerzo efectivo normal al plano

$c'$  = Cohesión aparente

$\phi'$  = Angulo de resistencia al corte

Existen cinco criterios para la obtención de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, para lo cual se hace uso de la grafica Esfuerzo vs. Deformación:

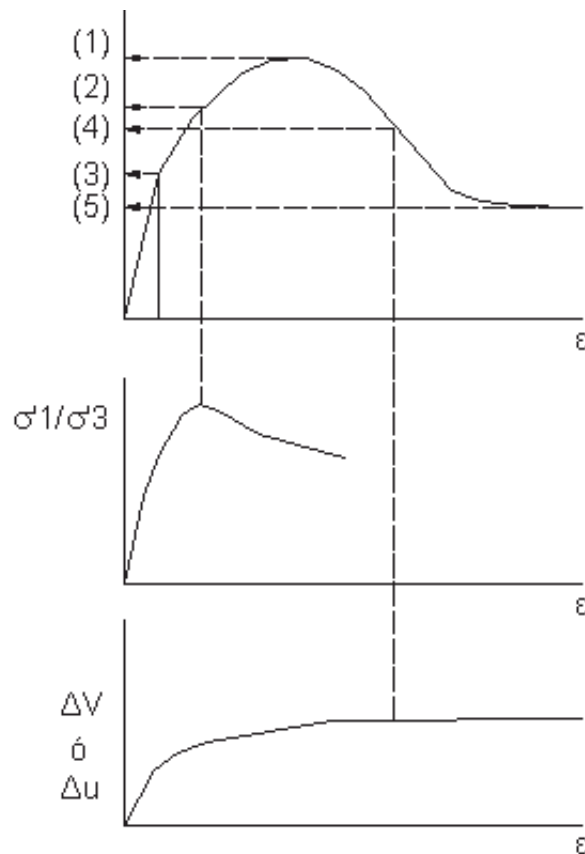
**Esfuerzo desviador pico:** Es la condición máxima del esfuerzo desviador al cual fue sometido el suelo (Fig. II.4 (1)).

**Relación de esfuerzo principal máxima:** Se obtiene la grafica  $\sigma'_1/\sigma'_3$  vs. Deformación, de la cual se obtiene el valor máximo de  $\sigma'_1/\sigma'_3$  para posteriormente con su deformación respectiva intersecar en la grafica de Esfuerzo vs. Deformación y encontrar el esfuerzo desviador efectivo (Fig. II.4 (2)).

**Límite elástico:** Es usada cuando la deformación del suelo es muy elevada (Fig. II.4 (3)).

**Estado crítico:** Consiste en graficar el Cambio Volumétrico vs. Deformación ó Cambio de Presión de Poro vs. Deformación y ver el momento en el cual el cambio permanece constante para posteriormente con su deformación respectiva, obtener el esfuerzo desviador efectivo de la grafica Esfuerzo vs. Deformación (Fig. II.4 (4)).

**Estado residual:** Se obtiene después de que el suelo ha llegado a su falla, para lo cual el esfuerzo desviador se continua aplicando, el cual ira disminuyendo hasta llegar a un valor constante, el cual es el esfuerzo deseado (Resistencia residual) (Fig. II.4 (5)).



**Figura II.4.- Criterios de falla idealizados para la obtención del esfuerzo cortante.**

Los parámetros de esfuerzo cortante  $c'$  y  $\phi'$ , pueden ser obtenidos de una serie de pruebas de compresión triaxial, trazando los círculos de Mohr, los cuales son obtenidos acorde a lo siguiente:

En la prueba de compresión triaxial el espécimen es sometido a los esfuerzos  $\sigma'_1$  y  $\sigma'_3$  ( $\sigma'_3 < \sigma'_1$ ) como se indica en la figura II.5a.

Los esfuerzos en las caras de un elemento en forma de cuña ABC (unitario en BC) son mostrados en la figura II.5b, para lo cual se tiene que:

$$\tan \alpha = C.O / C.A = \sigma'_3 / \sigma'_1$$

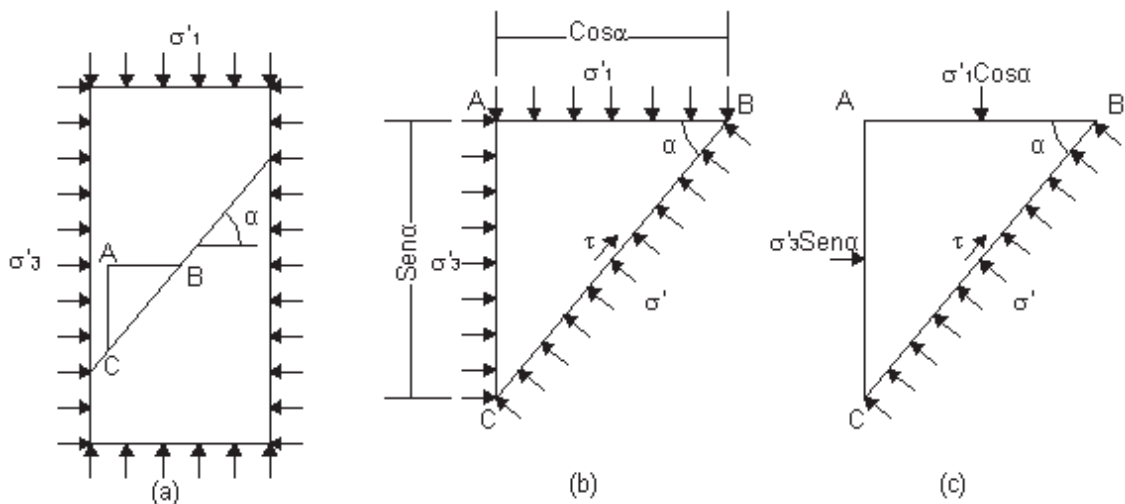
$$\sin \alpha = C.O / H = \sigma'_3 / \sigma', \text{ es decir que: } \sigma'_3 = \sigma' \sin \alpha$$

$$\cos \alpha = C.A / H = \sigma'_1 / \sigma', \text{ es decir que: } \sigma'_1 = \sigma' \cos \alpha$$

Por lo tanto  $\tan \alpha = \epsilon' \operatorname{Sen} \alpha / \epsilon' \operatorname{Cos} \alpha = \operatorname{Sen} \alpha / \operatorname{Cos} \alpha$ , es decir que la cara AC corresponde al  $\operatorname{Sen} \alpha$  y para la cara AB el  $\operatorname{Cos} \alpha$ .

Ahora bien si los esfuerzos son convertidos a fuerzas (Fig. II.5c), se tiene que:

| Cara | Fuerza Normal                         | Fuerza Cortante |
|------|---------------------------------------|-----------------|
| AB   | $\sigma'_1 \operatorname{Cos} \alpha$ | 0               |
| AC   | $\sigma'_3 \operatorname{Sen} \alpha$ | 0               |
| BC   | $\sigma'$                             | $\tau$          |



**Figura II.5.- Esfuerzos en un espécimen sujeto a compresión triaxial.**

Si se dibujan vectorialmente estas fuerzas tendremos como resultado un polígono cerrado (puesto que la cuña está en equilibrio) como se muestra en la figura II.6. Con ayuda de este polígono pueden obtenerse los círculos de Mohr, para lo cual es necesario trazar una línea horizontal que pase por el punto P y prolongar OQ hasta interceptarse ambas, obteniendo de esta manera el punto R.

Puede observarse que:

$$\operatorname{Sen} \alpha = OV / OS, \text{ por lo que } OS = OV / \operatorname{Sen} \alpha = \sigma'_3 \operatorname{Sen} \alpha / \operatorname{Sen} \alpha$$

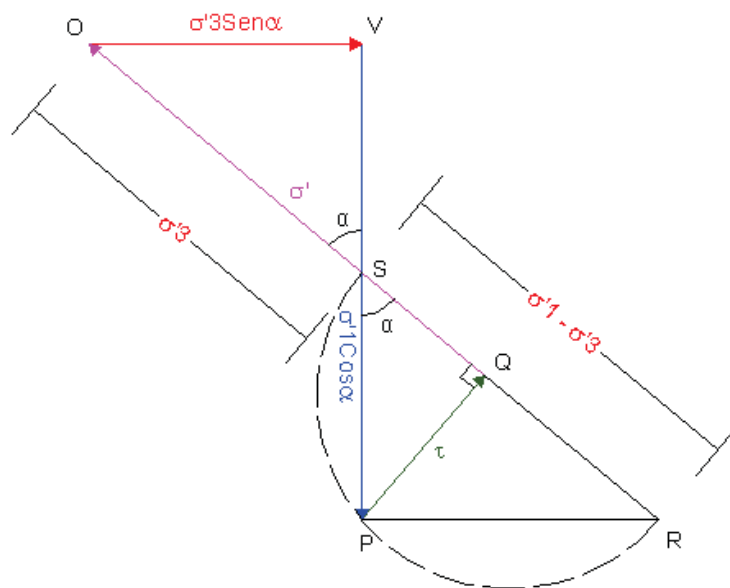
Por lo tanto:  $OS = \sigma'_3$

Por lo que:  $\cos\alpha = VS$ , por lo tanto:  $VS = \sigma'_3 \cos\alpha$

Ahora bien si  $PS = PV - VS = \sigma'_1 \cos\alpha - \sigma'_3 \cos\alpha = \cos\alpha (\sigma'_1 - \sigma'_3) = PS$

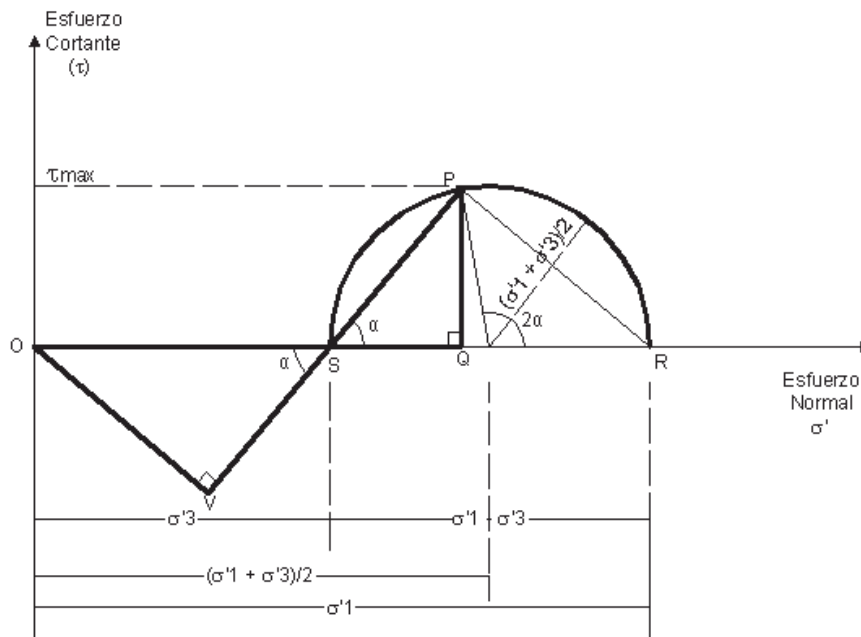
Si  $\cos\alpha = PS / SR$ ,  $SR = \cos\alpha (\sigma'_1 - \sigma'_3) / \cos\alpha$ , es decir:  $SR = (\sigma'_1 - \sigma'_3)$

Acorde a estas formulaciones se puede decir que  $OS = \sigma'_3$  y  $SR = (\sigma'_1 - \sigma'_3)$ , para cualquier ángulo  $\alpha$ , esto debido a que el Angulo SPR es recto. El punto P puede quedar envuelto en un círculo con diámetro  $(\sigma'_1 - \sigma'_3)$ , como se indica en la figura II.6.



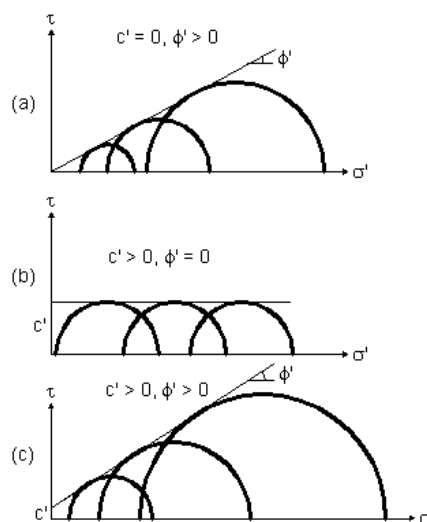
**FIGURA II.6.- Polígono de fuerzas para compresión triaxial.**

Posteriormente el Círculo se dibuja como se muestra en la figura II.7, donde el Eje X queda representado por los esfuerzos normales (línea OR) y el Eje Y por los esfuerzos cortantes. El círculo no pasa por el origen, pero intercepta a  $(\sigma'_1 - \sigma'_3)$  en el eje horizontal, quedando su eje a una distancia de  $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$  del origen.



**FIGURA II.7.- Diagrama de Mohr de compresión triaxial.**

Con lo anterior puede resumirse que el círculo de Mohr es obtenido con ayuda de los esfuerzos efectivos  $\sigma'_1$  y  $\sigma'_3$ , trazando el círculo a una distancia de  $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$  del origen, con un diámetro de  $(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$ , lo cual es realizado con cada uno de los especímenes del suelo en estudio, para posteriormente obtener una línea que envuelva a los especímenes llamada envolvente de falla, para así obtener  $\phi'$  y  $c'$  como lo indica la figura II.8.



**FIGURA II.8.- Envoltentes de falla para distintos tipos de materiales: (a) Suelo granular, (b) Suelo cohesivo y (c) Suelo cohesivo friccionante.**

## II.2.5 Coeficientes de Presión de Poro en Suelos Saturados

### II.2.5.1 Cambios de Esfuerzo Total y de Presión de Poro

Los coeficientes de presión de poro fueron definidos por Skempton en 1954, los cuales tienen como finalidad expresar los cambios de presión de poro y esfuerzo total en un suelo.

Inicialmente en una prueba triaxial un espécimen no está sometido a ninguna presión, como lo indica la figura II.9a. En una prueba triaxial los esfuerzos son aplicados en dos etapas:

Se aplica una presión de confinamiento  $\Delta\sigma_3$ , lo cual provoca un incremento en la presión de poro  $\Delta u_c$  (figura II.9b), la presión de confinamiento es considerada isotrópica debido a que este esfuerzo es aplicado sobre el espécimen por medio del agua. Por lo tanto el espécimen en contacto con el agua adquiere la presión ejercida, a su vez la cara superior también soporta la misma presión la cual es aplicada sobre el cabezal del vástago y la inferior presenta una reacción igual a la presión ejercida.

Se aplica un incremento en el esfuerzo axial (esfuerzo desviador  $\Delta\sigma_d$ ), lo cual provoca un segundo incremento en la presión de poro  $\Delta u_d$  (figura II.9c), generalmente el esfuerzo desviador es denotado como  $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$ , esto debido a que el esfuerzo vertical total ( $\Delta\sigma_1$ ) está aplicando el esfuerzo de confinamiento  $\Delta\sigma_3$  y el esfuerzo desviador ( $\Delta\sigma_d$ ), por lo tanto, si se despeja el esfuerzo desviador este quedará como la diferencia del esfuerzo total vertical menos el esfuerzo total de confinamiento.

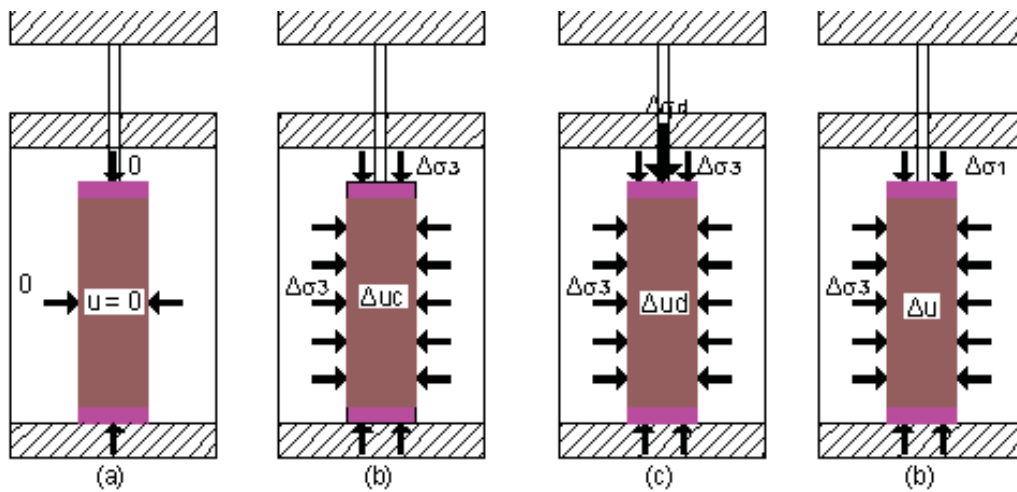
El cambio total resultante en los esfuerzos y la presión de poro (figura II.9d) quedan expresados como:

$$\text{Esfuerzo Horizontal:} \quad \Delta\sigma_3 + 0 = \Delta\sigma_3$$

$$\text{Esfuerzo Vertical:} \quad \Delta\sigma_3 + (\Delta\sigma_d) = \Delta\sigma_3 + (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) = \Delta\sigma_1$$

Presión de Poro:

$$\Delta u = \Delta u_c + \Delta u_d$$



**Figura II.9.- Esfuerzos aplicados a un espécimen sometido a compresión triaxial. a) Compresión inicia, b) Incremento de presión de confinamiento, c) incremento de esfuerzo desviador y d) cambio resultante.**

La componente  $\Delta u_c$  originada por el cambio isotrópico del esfuerzo confinante, es relacionada con el cambio del coeficiente  $B$  definido por la ecuación:

$$\Delta u_c = B \Delta \sigma_3 \quad (II.10)$$

La componente  $\Delta u_d$  originada por el incremento del esfuerzo desviador depende de los coeficientes  $B$  y  $A$ , los cuales son explicados en los capítulos siguientes.

Estos coeficientes son originados por los aumentos y disminuciones de los esfuerzos.

### II.2.5.2 Coeficiente $B$ en Suelos Saturados

En un suelo saturado sin drenaje sometido a un esfuerzo, la compresión de la estructura del suelo es la misma que la compresión del agua en los vacíos (asumiendo que la compresibilidad de los granos del suelo puede ser descuidada).

Un incremento isotrópico en el esfuerzo confinante  $\Delta\sigma_3$ , causa un incremento en la presión de poro  $\Delta u_c$ , con lo cual, el esfuerzo efectivo queda definido como:

$$\Delta\sigma'_3 = \Delta\sigma_3 - \Delta u_c \quad (II.11)$$

Si el cambio de volumen unitario del esqueleto del suelo es definido por la ecuación  $\Delta V/V = -C_s \Delta\sigma'_3$ , podemos decir que  $\Delta V/V = -C_s (\Delta\sigma_3 - \Delta u_c)$ , por lo que el cambio de volumen es  $\Delta V = -C_s V (\Delta\sigma_3 - \Delta u_c)$ . Por lo tanto el cambio de volumen unitario del agua queda definido por la ecuación  $\Delta V_w/V_w = -C_w \Delta u_c$ , por lo que  $\Delta V_w = -C_w V_w \Delta u_c$ .

En un elemento de suelo con volumen  $V$ , el volumen de vacíos es igual a  $nV$ , por lo tanto si el suelo esta saturado  $nV = V_w$ , es decir que  $\Delta V_w = -C_w nV \Delta u_c$ .

Ahora bien si las partículas sólidas y las del agua son incompresibles, se tiene que  $\Delta V$  y  $\Delta V_w$  son iguales, es decir:

$$-C_s V (\Delta\sigma_3 - \Delta u_c) = -C_w nV \Delta u_c \quad (II.12)$$

Despejando la presión de poro:

$$\Delta u_c = (1 / (1 + nC_w/C_s)) \Delta\sigma_3 \quad (II.13)$$

Por lo tanto, si  $\Delta u_c = B \Delta\sigma_3$ ,  $B$  queda definido por la ecuación:

$$B = (1 / (1 + nC_w/C_s)) \quad (II.14)$$

Haciendo referencia a los valores dados en la tabla II.1 (donde está la tabla), el cociente  $C_w/C_s$  es muy pequeño y por lo tanto el valor de  $B$  para un suelo saturado es muy cercano a 1; para propósitos prácticos  $B = 1$  para una saturación, con lo cual el esfuerzo total es tomado en su totalidad por el incremento de la presión de poro sino existe drenaje.

### II.2.5.3 Coeficiente A en Suelos Saturados

Los esfuerzos cortantes en un espécimen producidos por la aplicación del esfuerzo desviador tienden a causar un cambio de volumen. En un suelo saturado causa que el agua sea expelida de o absorbida dentro del espécimen, si se permite el drenaje. Si el drenaje es impedido, el intento de cambio de volumen resulta en un cambio en la presión de poro en el agua.

Si un suelo fuera perfectamente elástico, el cambio de presión de poro  $\Delta u_d$  sería dado por una tercera parte del esfuerzo desviador por el coeficiente B.

Pero los suelos generalmente no son elásticos, por lo tanto la presión de poro  $\Delta u_d$  queda definida por la ecuación:

$$\Delta u_d = AB (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad (II.15)$$

Donde A es un coeficiente deducido experimentalmente, que relaciona los cambios de presión de poro con los del esfuerzo desviador y se encuentra en un rango de -0.5 a 1.0.

### II.2.5.4 Ecuación General de la Presión de Poro

Al realizar una prueba triaxial se tiene que la presión de poro será resultado de una combinación de los esfuerzos de confinamiento y desviador aplicados, es decir:

$$\Delta u = \Delta u_c + \Delta u_d = B \Delta \sigma_3 + AB (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$$

$$\Delta u = B (\Delta \sigma_3 + A (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)) \quad (II.16)$$

Para un suelo saturado B = 1, por lo tanto

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad (II.17)$$

Debido a que en una prueba triaxial la presión de confinamiento es constante  $\Delta\sigma_3 = 0$ , es decir que:

$$\Delta u = A (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \quad (II.18)$$

Por lo cual el coeficiente  $A$  es definido como:

$$A = \Delta u / (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \quad (II.19)$$

## II.2.6 Coeficientes de Presión de Poro en Suelos Parcialmente Saturados

El análisis en suelos parcialmente saturados es más complejo por dos razones:

- La alta compresibilidad del gas, lo cual es de suma importancia en la compresibilidad del suelo.
- La presión en los fluidos (aire y agua) no es igual, lo cual conlleva a la medición de la presión de poro en el aire y en el agua.

Para poder determinar los esfuerzos efectivos, Bishop y Henkel (1962) modificaron la ecuación de esfuerzo efectivo para considerar la presión de poro en el aire:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi (u_a - u_w) \quad (II.20)$$

En la cual el coeficiente  $\chi$  depende del grado de saturación y el tipo de suelo, para lo cual varía desde 0 para suelos secos hasta 1 para suelos saturados, esto es mostrado en la figura II.10 para algunos suelos típicos.

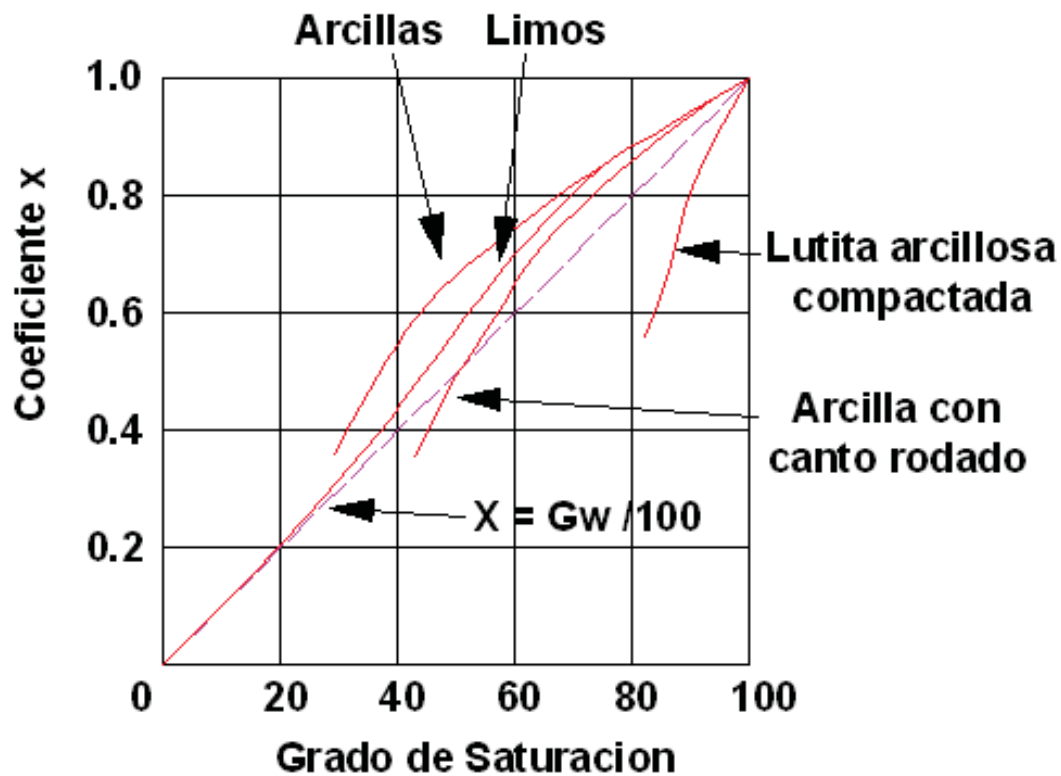


Figura II.10.- Relación entre el coeficiente  $\chi$  y el grado de saturación para varios tipos de suelo.

Acorde a lo mencionado puede apreciarse que un incremento en el esfuerzo total  $\Delta\sigma_3$  es soportado por la presión de poro (aire y agua) y por el esfuerzo efectivo del suelo. El valor de  $B$  depende de la compresibilidad del esqueleto, así como del grado de saturación, con lo cual se determina la compresibilidad media del fluido mixto del poro expresado como  $C_r$ , con lo cual la ecuación que define el coeficiente  $B$  es:

$$B = 1 / (1 + nC_r/C_s) \quad II.21$$

La relación entre  $B$  y el grado de saturación tiene la forma mostrada en la figura II.11 la cual es mostrada a continuación:

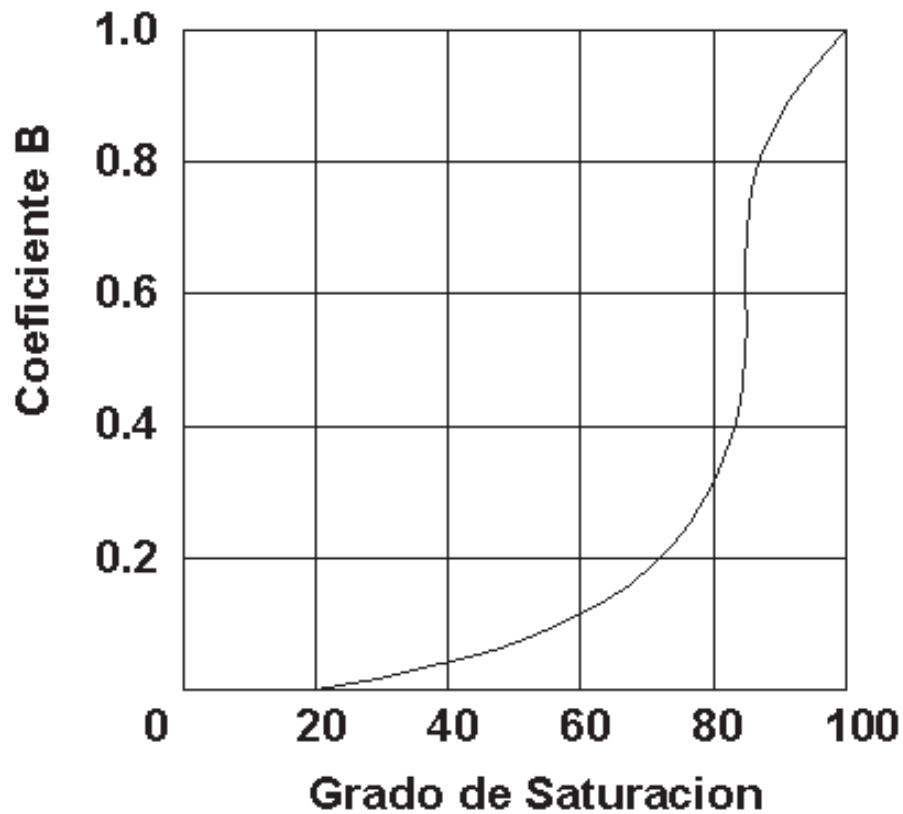


Figura II.11.- Relación entre el coeficiente de presión de poro y el grado de saturación.

Para suelos parcialmente saturados el producto  $AB$  es reemplazado por el coeficiente  $Am$ :

$$\Delta u = B\Delta\sigma_3 + Am (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \quad II.22$$

El coeficiente  $Am$  es determinado experimentalmente en pruebas de compresión triaxial.

A continuación se muestra una tabla con algunas aplicaciones de los distintos tipos de pruebas triaxiales para diversos tipos de problemas de campo:

### II.3. Aplicación de Pruebas Triaxiales.

| Problema de Campo                                                    | Periodo Crítico                                      | Tipo de Análisis                                               | Parámetros                       | Tipo de Prueba                                 |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|
| Estabilidad de cimientos estructurales:<br>En arcilla intacta suave. | Al final de la construcción.                         | Esfuerzos Totales.                                             | $c_u, \phi_u = 0$ .              | UU ó CU.                                       |
| En arcilla agrietada.                                                |                                                      |                                                                | $c_u, \phi_u = 0$ .              | UU ó C-QU.                                     |
| Estructuras de retención de tierra.                                  | Al final de la construcción.<br>A largo plazo.       | Esfuerzos Totales.<br>Esfuerzos Efectivos.                     | $c_u, \phi_u$ .<br>$c', \phi'$ . | UU.<br>CU ó CD.                                |
| Terraplenes:                                                         |                                                      |                                                                |                                  |                                                |
|                                                                      | Durante la construcción.<br>Corto plazo.             | Esfuerzos Efectivos.                                           | $c_d, \phi_d$ .                  | CD (parcialmente saturado).<br>UU ó CU.<br>CD. |
|                                                                      | Largo plazo.                                         | Esfuerzos Totales.                                             | $c_u, \phi_u = 0$ .              |                                                |
|                                                                      | Largo plazo.                                         | Esfuerzos Efectivos.                                           | $c_d, \phi_d$ .                  |                                                |
|                                                                      | Largo plazo.                                         | Esfuerzos Efectivos.                                           | $c_d, \phi_d$ .                  |                                                |
| Pedregoso                                                            |                                                      |                                                                |                                  |                                                |
| Taludes Naturales:<br>Primera vez que se desliza.                    | Largo plazo.                                         | Esfuerzos Efectivos.                                           | $c_d, \phi_d$ .                  | CD o CU.                                       |
| Cortes:                                                              |                                                      |                                                                |                                  |                                                |
| Primera vez que se desliza.                                          | Durante la construcción.<br>Largo plazo.             | Esfuerzos Totales.<br>Esfuerzos Efectivos                      | $c_u, \phi_u$ .<br>$c', \phi'$ . | QU (expansión y compresión).<br>CU.            |
| Presas de tierra                                                     | Durante la construcción.                             | Esfuerzos Totales.                                             | $c_u, \phi_u$ .                  | QU (expansión o compresión)                    |
| Guarniciones de Túnel.                                               | Largo plazo.                                         | Esfuerzos Totales y Efectivos.                                 | Ko                               |                                                |
| Excavaciones Temporales:<br>Arcilla Intacta.<br>Arcilla Agrietada.   | Durante la construcción.<br>Durante la construcción. | Esfuerzos Totales.<br>Esfuerzos Efectivos.                     |                                  | QU ó CU.<br>CU ó CD.                           |
| Muros de Contención.                                                 | Inmediato.<br>Largo Plazo.                           | Esfuerzos Totales.<br>Esfuerzos Efectivos con presión de poro. | $c_u, \phi_u$ .<br>$c', \phi'$ . | QU ó CU.<br>CU ó CD.                           |

**Tabla II.2.- Aplicaciones de pruebas triaxiales para distintos problemas de campo.**

## **CAPITULO III**

### **Descripción del Equipo de Compresión Triaxial**

**III.1 Cámara de Compresión Triaxial.**

**III.2 Marco de Carga.**

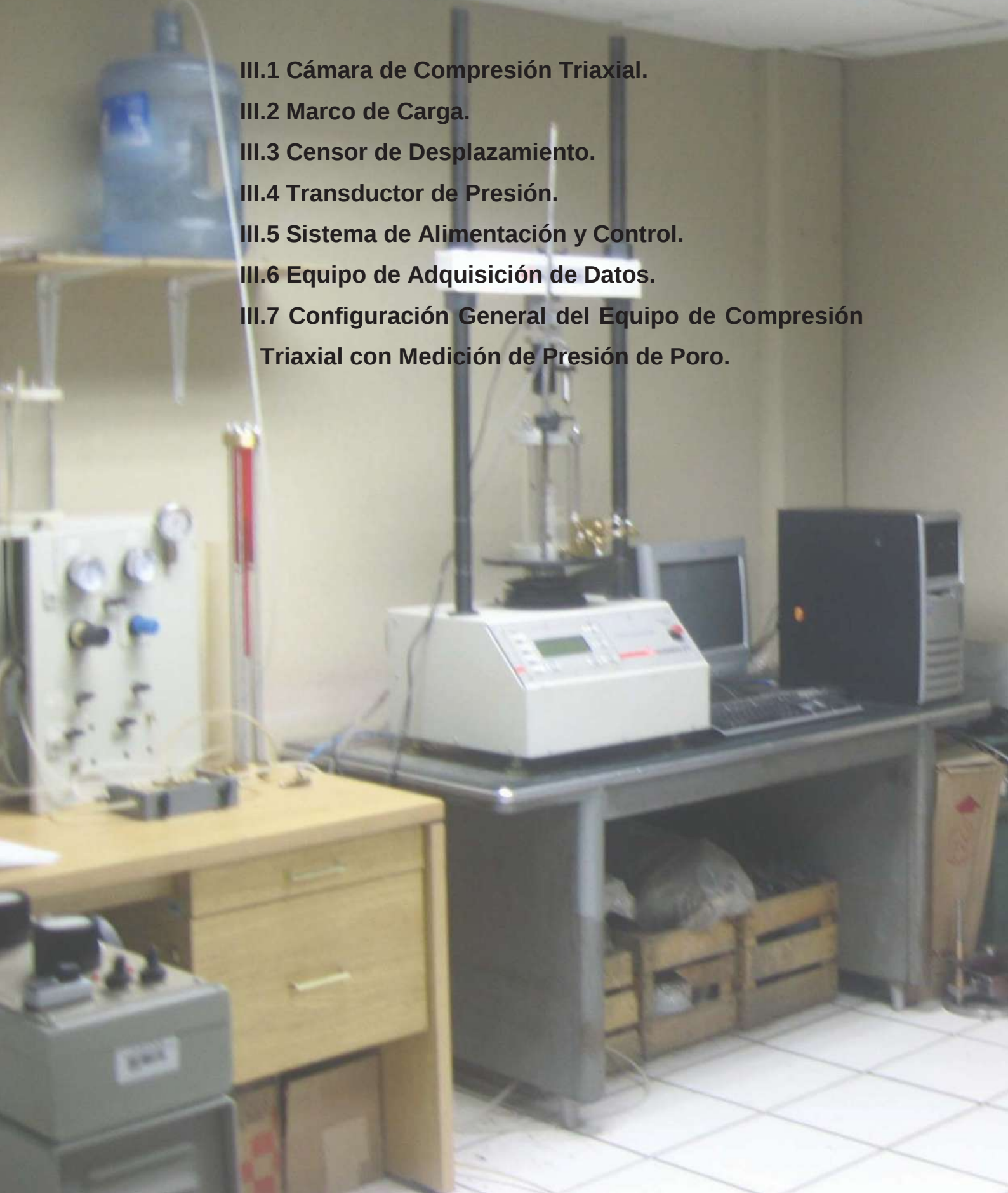
**III.3 Censor de Desplazamiento.**

**III.4 Transductor de Presión.**

**III.5 Sistema de Alimentación y Control.**

**III.6 Equipo de Adquisición de Datos.**

**III.7 Configuración General del Equipo de Compresión Triaxial con Medición de Presión de Poro.**



## CAPITULO III

### Descripción del Equipo de Compresión Triaxial.

Para la realización de los distintos ensayos triaxiales (UU, CU y CD) es utilizado el equipo de pruebas de compresión triaxial con medición de presión de poro, para ello dividiremos el equipo en las siguientes partes:

1. Cámara de Compresión Triaxial.
2. Marco de Carga.
3. Sensor de Desplazamiento.
4. Transductor de Presión.
5. Sistema de Control.
6. Equipo de Adquisición de datos.

#### III.1 Cámara de Compresión Triaxial.

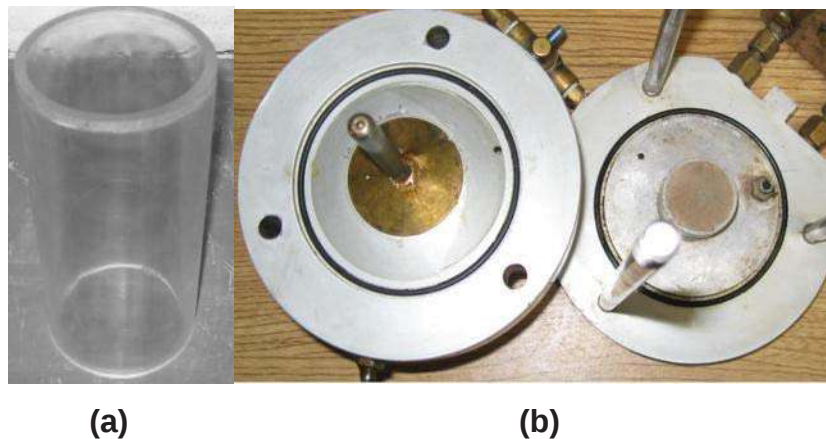
En la figura III.1 se muestra una imagen de la Cámara de Compresión Triaxial utilizada para la ejecución de los ensayos.



**Figura III.1.- Cámara de compresión triaxial.**

La finalidad de la cámara, es la de montar el espécimen del suelo en estudio, para posteriormente someterlo a los esfuerzos de confinamiento, contrapresión y esfuerzo desviador; así como la admisión o expulsión de agua a la cámara y el espécimen durante la prueba.

La cámara se conforma por un cilindro de acrílico conocido como cuerpo de la cámara (Figura III.2a), el cual tiene una altura aproximada de 21cms, con un diámetro exterior de 12.5cms y un espesor de 0.65cms en su pared. Dicho cilindro se acopla en dos placas semiredondas metálicas, conocidas como base y cabezal de la cámara (Figura III.2b), las cuales son selladas perfectamente por medio de goma o hule, logrando así la admisión de agua dentro de la cámara para posteriormente aplicar la presión de confinamiento al espécimen sin tener fugas de agua.



**Figura III.2.- (a) Cuerpo de la cámara. (b) Base y cabezal de la cámara.**

En la zona interior de la cámara se localizan dos cilindros cortos conocidos como pedestal y cabezal del espécimen, los cuales constan de piedras porosas en los contactos con el espécimen (Figura III.3). Estos cilindros están perforados con la finalidad de permitir el flujo del agua. Para lo cual el cabezal del espécimen es comunicado con la base de la cámara por medio de una manguera de 3mm; y el pedestal del espécimen forma parte de la base de la cámara, la cual es atravesada materialmente, para comunicar con un juego de válvulas.



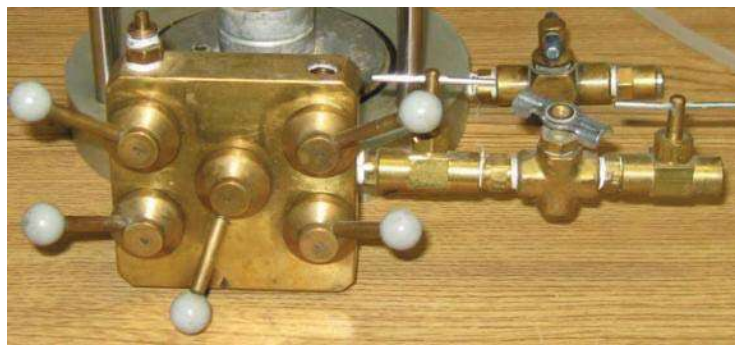
**Figura III.3.- Cabezal y pedestal del espécimen.**

El cabezal del cilindro cuenta con una perforación donde se localiza el vástago (Figura III.4), que tiene como finalidad la transmisión de la carga axial al espécimen. Para poder aplicar la carga, el vástago es apoyado en el cabezal del espécimen, para distribuir de manera uniforme la carga al espécimen.



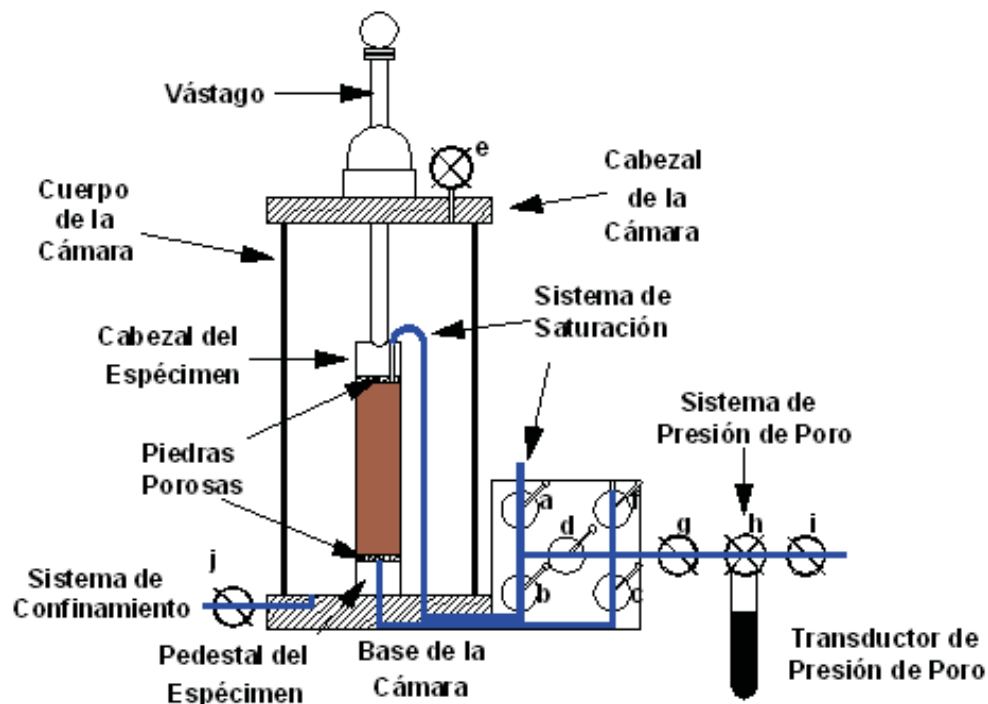
**Figura III.4.- Vástago.**

En la base del cilindro se localiza un juego de válvulas (Figura III.5), las cuales comunican con las piedras porosas del espécimen, el transductor de presión de poro, el sistema de contrapresión y presión de confinamiento. El objetivo primordial del sistema de válvulas es permitir o impedir el paso del agua dentro o fuera de la cámara y del espécimen.



**Figura III.5.- Válvulas de admisión y expulsión de agua de la cámara.**

Un esquema detallado de las partes de la cámara de compresión triaxial es mostrado en la Figura III.6.



**Figura III.6.- Conexiones de la cámara triaxial para pruebas de esfuerzo efectivo.**

A continuación se menciona cada una de las válvulas que conforman a la cámara triaxial:

- **Válvula a:** Permite el paso de agua al juego de válvulas de saturación del sistema y el espécimen, así como aplicación de la contrapresión al espécimen.
- **Válvula b:** Comunica con el cabezal del espécimen y es utilizada para aplicar la contrapresión al espécimen y su saturación.
- **Válvula c:** Comunica con la base del espécimen y es utilizada para permitir el paso del agua al sistema de presión de poro.

- **Válvula d:** Permite el paso directo del flujo proveniente de la válvula “a” hacia las válvulas “f, c y g”, y es utilizada con el objetivo de saturar el sistema de válvulas en su totalidad antes de iniciar la prueba, para posteriormente montar el espécimen y realizar su saturación de manera adecuada.
- **Válvula e:** Es utilizada como purga de aire de la cámara, esto con la finalidad de poder saturar completamente la cámara triaxial y así aplicar la presión de confinamiento.
- **Válvula f:** Por el momento se encuentra deshabilitada.
- **Válvula g:** Comunica el flujo proveniente de la base del espécimen con el transductor de presión de poro (dicha válvula trabaja en conjunto con la válvula c).
- **Válvula h:** Es utilizada como purga de aire para la saturación correcta del sistema de presión de poro.
- **Válvula i:** Es utilizada como drenaje del sistema.
- **Válvula j:** Permite la saturación de la cámara triaxial, así como la aplicación de la presión de confinamiento.

Cabe mencionar que cuando es realizada la consolidación del espécimen, el agua contenida en sus vacíos tendera a fluir por el cabezal del espécimen hacia la bureta y posteriormente hacia la interfase, siempre y cuando se encuentren abiertas las válvulas b, a y las correspondientes al controlador de flujo de la bureta (VB1 Y VB2), así como la válvula de paso de la interfase (V6). El único caso donde entra el agua al espécimen es en la fase de saturación.

### III.2 Marco de Carga.

La aplicación de carga a un espécimen en estudio es realizado por medio del marco de carga digital para pruebas de compresión MasterLoader HM-3000 de la compañía Humboldt (Figura III.7). Esta máquina consta de un control de velocidad del motor, el cual puede manejarse desde la misma máquina o por medio de su software con la computadora, y tiene un rango de velocidad de 0.000001 a 75mm/min. Este motor al ensayar una muestra hace subir el platillo ubicado en la zona inferior de la marco de carga, sobre el cual se coloca la cámara de compresión triaxial hasta llevar al espécimen a su falla, para posteriormente detener la aplicación de carga y hacer descender el platillo. A su vez el marco de carga consta de un **marco roscado**, que le permite ajustarse a la altura deseada (puesto que la maquina es usada para diferentes tipos de pruebas de compresión). En este marco se encuentra localizada la celda de carga, la cual puede soportar una carga máxima de 50KN arrojando un grado de precisión confiable.



**Figura III.7.- Marco de carga digital para pruebas de compresión  
MasterLoader HM-3000 Humboldt.**

Para la aplicación de la carga (esfuerzo desviador) primeramente debe montarse sobre el platillo la cámara triaxial con el espécimen para posteriormente ajustar el marco, de tal manera que el vástago de la cámara haga contacto con la celda de carga. Una vez montado correctamente el

equipo se hace subir el platillo del marco el cual ira ejerciendo un esfuerzo sobre la celda de carga, que tomara las lecturas de los cambios de carga ejercidos sobre el espécimen.

### **III.3 Censor de Desplazamiento.**

Los cambios de deformación axial que sufre el espécimen tras someterlo a un esfuerzo desviador, son tomados por el censor de desplazamiento (Figura III.8), el cual tiene una deformación máxima de 25mm dando una gran confiabilidad y precisión en las lecturas. Este dispositivo de medida esta ubicado en la zona superior del marco junto a la celda de carga sujeto por una abrazadera.

Par tomar la lectura de las deformaciones que sufre el espécimen, en el platillo del marco se encuentra un tubo roscado en el cual se coloca una pequeña plataforma sobre la cual descansa el censor de desplazamiento, entonces una vez que es iniciada la prueba el platillo tiende a subir junto con la plataforma, la cual va empujando el censor de desplazamiento que registrara estos cambios hasta llegar a la falla del espécimen; para posteriormente hacer descender el platillo y con ello el censor de desplazamiento.



**Figura III.8.- Censor de Desplazamiento.**

Nota: Es importante verificar durante la prueba que el censor no ha llegado a su lectura máxima, para evitar que sea forzado y descomponerlo.

### III.4 Transductor de Presión.

La medición de las presiones de confinamiento y contrapresión que se aplican al espécimen son medidas por medio de manómetros, pero a diferencia de estas la presión de poro es medida por medio de un transductor de presión (Figura III.9), debido a que nos proporciona un mejor control sobre las presiones y una adecuada adquisición de datos.

El transductor de presión esta ubicado en el juego de válvulas de la cámara triaxial, como lo indica la Figura III.6 el cual trabaja en conjunto con las válvulas “c y g” para poder tomar la presión que esta siendo aplicada sobre el espécimen.



**Figura III.9.- Transductor de Presión de Poro**

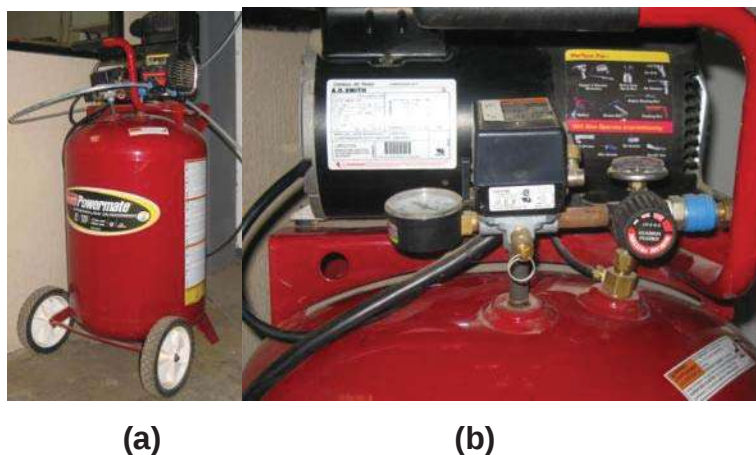
### III.5 Sistema de Alimentación y Control.

Este sistema tiene como función principal la de controlar las presiones de confinamiento y contrapresión durante la prueba para la saturación del espécimen. Para lograr la saturación son utilizados los sistemas de alimentación de agua y aire; otra función importante es dar a conocer los cambios de volumen que sufre el espécimen durante la prueba. Para describir este equipo dividiremos el sistema en las siguientes partes:

- a. Sistema de Alimentación de Aire.
- b. Sistema de Alimentación de Agua.
- c. Panel de Control.
- d. Interfase Aire-Agua.
- e. Sistema de Medición de Volumen

**a.- Sistema de Alimentación de Aire** (Figura III.10): El abastecimiento de la presión de confinamiento y de la contrapresión necesaria para la realización de la prueba es manejado desde este sistema, el cual consta principalmente de un compresor de aire automático que comunica con el panel de control.

Para que el compresor trabaje consta de un motor de 6Hp automático que se encarga del llenado del tanque el cual trabaja con una fuente de 120 volts. A su vez este motor tiene un switch de encendido y apagado (S), que da inicio al llenado del tanque al ser encendido. El tanque tiene capacidad máxima de presión de 125psi. Para conocer la presión del tanque, el compresor cuenta con un Manómetro (MT), además, el tanque tiene un regulador de presión (RC) y su manómetro, que comunica con el Panel de Control (MC). Cuando la presión del tanque baja a 95psi inicia automáticamente su llenado.



**Figura III.10.- Sistema de abastecimiento de aire (a) Compresor de aire, (b) motor, switch y regulador del compresor.**

En la figura III. 20 puede observarse cada una de las partes que conforman el compresor de aire, y como comunica con el panel de control.

**b.- Sistema de Alimentación de Agua** (Figura III.11): su función es proporcionar el agua necesaria a los sistemas de confinamiento y contrapresión, para la saturación del espécimen y de la cámara triaxial.

Para realizar la alimentación el sistema se conforma por un garrafón, para el almacenamiento del agua, cuya capacidad es de 19lts. A su vez el sistema tiene una válvula (VA), que comunica el flujo del agua hacia el panel de control por medio de manguera de 6mm de diámetro por 1mm de espesor (Pun-6x1). Este sistema trabaja gravitacionalmente.



**Figura III.11.- Sistema de alimentación de agua.**

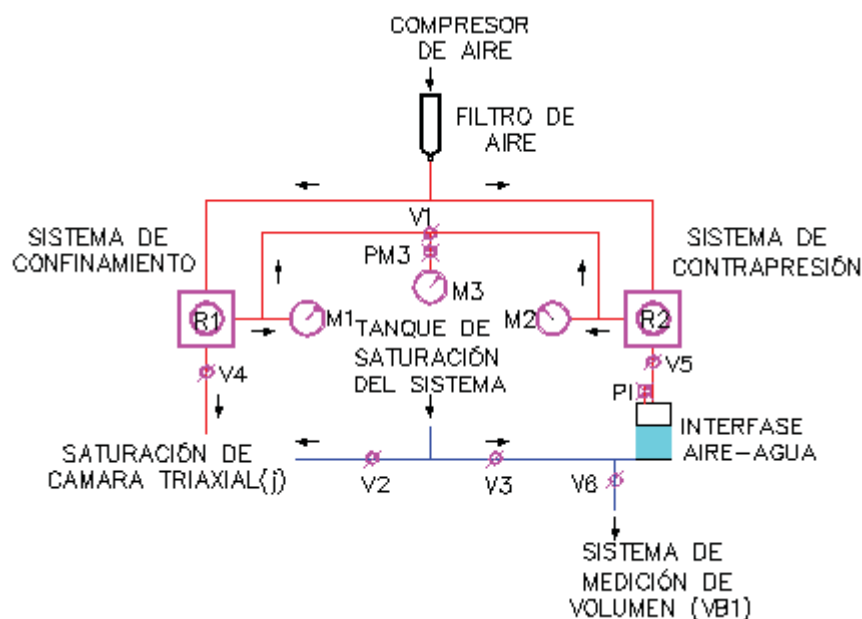
En la figura III. 20 se muestra más claramente como comunica el sistema de alimentación de agua con el panel de control.

**c.- Panel de Control** (Figura III.12): Se conforma por un gabinete donde se manejan las presiones de confinamiento y contrapresión por medio de los reguladores de presión (uno para cada sistema). Los cuales comunican con sus respectivos manómetros, para conocer la presión que se va aplicar, y con una serie de válvulas; esta comunicación es lograda por medio de manguera Pun-6x1. La función principal del panel de control es la de comunicar el aire y agua provenientes de los sistemas de alimentación con las interfaces aire-agua para así aplicar las presiones deseadas al espécimen.



**Figura III.12.- Panel de control.**

Un esquema detallado de las conexiones que conforman el panel de control es mostrado en la Figura III.13.



**Figura III.13.- Conexión del Panel de Control para el manejo de las presiones de confinamiento y contrapresión.**

Como puede observarse todas las piezas son comunicadas por manguera Pun-6x1 (líneas rojas y azules), que tienen su fuente de alimentación. Para el caso del sistema de aire (líneas rojas), se abastece por medio del compresor de aire y el sistema de agua (líneas azules), por medio del tanque de saturación.

A continuación se hará mención de cada una de las partes que conforman el panel de control y la función que desarrollan en el equipo:

**Manómetros de Carátula:** su función es dar la lectura de la presión a la cual será sometido el espécimen durante la prueba.

- **M1:** Manómetro de la presión de confinamiento de hasta 160kPa (Seal Fast).
- **M2:** Manómetro de la contrapresión de hasta 160kPa (Seal Fast).
- **M3:** Manómetro de carátula WIKA de  $7\text{kg/cm}^2$ , el cual es utilizado para tomar lecturas de presión de confinamiento o contrapresión de manera más precisa, este manómetro trabaja en conjunto con la válvula V1 y PM3.

**Reguladores de presión:** son utilizados para aumentar o disminuir la presión a la cual se desea someterse al espécimen durante la prueba.

- **R1:** Regulador de la presión de confinamiento.
- **R2:** Regulador de la contrapresión.

**Válvulas de control:** tienen como función principal la de admitir o restringir el paso de los fluidos (aire o agua) a través de ellas.

- **V1:** Es una válvula de tres vías, la cual tiene la opción de permanecer cerrada, seleccionar la medición de la presión de confinamiento o la de la contrapresión con ayuda del manómetro M3.
- **V2:** Válvula de alimentación de agua del sistema de confinamiento, que es abastecida desde el tanque y comunica con la válvula j de la cámara triaxial.

- **V3:** Válvula de alimentación de agua de la interfase aire-agua del sistema de contrapresión.
- **V4:** Válvula de admisión de aire para la presión de confinamiento. Esta válvula comunica de manera directa con la válvula j de la cámara triaxial.
- **V5:** Válvula de admisión de aire para la contrapresión. Esta válvula comunica directamente con la interfase aire-agua.
- **V6:** Válvula de alimentación de agua para la saturación del espécimen.
- **PM3:** Purga de aire del manómetro 3, el cual es utilizado cuando la aplicación de presión es mayor al rango del manómetro, para purgar el aire que este llegando al manómetro y evitar con ello que sea descalibrado.
- **PI:** Purga de aire de la internase Aire-Agua la cual es utilizada para el llenado de agua de la interfase.

**d.- Interfase Aire-Agua** (Figura III.14): La finalidad de una interfase es la de juntar en una cámara el aire y el agua, para así ejercer la presión deseada en el aire y posteriormente transmitirla al agua y aplicarla sobre el espécimen.

La interfase aire-agua está constituida por un cilindro de acrílico (cuerpo de la interfase) acoplado en dos placas redondas (base y cabezal de la interfase), selladas perfectamente por medio de goma o hule para evitar fugas de agua. Para poder realizar el llenado de agua de la cámara de manera satisfactoria, cuenta con una purga de aire en el cabezal de la interfase (PI).



**Figura III.14.- Interfase aire-agua.**

En el Figura III.13 puede observarse mas claramente como es suministrado el aire y el agua en dicha interfase.

**e.- Sistema de Medición de Volumen** (Figura III.14): la medición de los cambios de volumen es realizada por medio de este sistema, el cual esta constituido por una cámara de medición volumétrica y un controlador de flujo, los cuales se describen a continuación:

- **Cámara de la Bureta:** su propósito es proporcionar los cambios de volumen que sufre el espécimen durante la prueba. El sentido del flujo puede variar con ayuda del control de flujo, esto con la finalidad de que si el cambio de volumen que sufre el espécimen durante la prueba es mayor al del rango que tiene la bureta pueda invertirse el sentido y así tener un rango infinito de lectura.

La cámara de la bureta está constituida por un cilindro de acrílico de 3.86cm de diámetro exterior y 0.30cm de espesor (cuerpo de la bureta), el cual se acopla en dos placas metálicas redondas (base y cabezal de la bureta). La unión entre las placas y el cilindro es sellada perfectamente por para permitir la saturación de la cámara y evitar fugas.

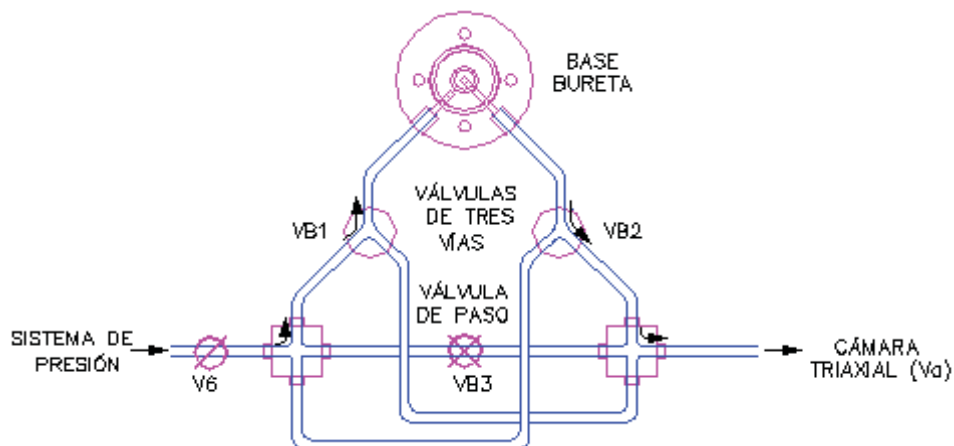
En la zona interior de la cámara se localiza una bureta de vidrio graduada con aproximación hasta al décimo mililitro la cual se acopla en la base de la bureta y es sujeta por medio de una goma en su costado para evitar fracturar el vidrio por las presiones, con lo anterior el interior de la cámara queda dividido en dos fases uno exterior formado entre el cuerpo de la cámara y la bureta; y otro interior formado solo por el cuerpo de la bureta. La base de la bureta cuenta con dos entradas, una que comunica con el interior de la bureta de vidrio y otra con el exterior con lo cual puede realizarse de manera adecuada la saturación de la cámara colocando en ambos lados un nivel determinado de agua, para posteriormente por el cabezal inyectar una cantidad de aceite mayor al rango de medición de la bureta, pues si el nivel de agua exterior pasa del nivel de la boca superior de la bureta, tendera a filtrarse al interior de la bureta y hará subir el aceite haciendo que el funcionamiento de la cámara no sea el correcto. Ya que se ha inyectado el aceite se coloca en el cabezal una purga de aire para poder saturar en su totalidad la cámara.

- **Control De Flujo:** se conforma por dos válvulas de tres vías y una de paso directo, la cuales tienen como objetivo comunicar el flujo proveniente de la interfase aire-agua con la cámara triaxial, para lo cual existen dos opciones. La primera es que el flujo comunique directamente con la cámara triaxial, lo cual es realizado principalmente para saturar el equipo antes de iniciar una prueba; y la segunda opción es que pase primeramente por la cámara de la bureta y posteriormente comunicar con la cámara triaxial, lo cual es realizado cuando se esta efectuando una prueba para tomar los cambios de volumen.



**Figura III.14.- Sistema de Medición de Volumen.**

Un esquema detallado de las conexiones que conforman el sistema de medición volumétrica es mostrado en la figura III.15.

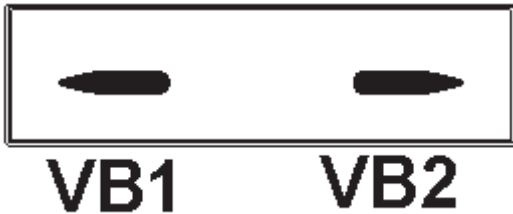


**Figura III.15.- Conexión del Sistema de Medición de Volumen.**

Puede observarse que el flujo proviene de la válvula V6 ubicada en el panel de control y comunica con las válvulas VB1, VB2 Y VB3. También puede observarse que la válvula VB1 comunica con la zona exterior de la bureta y la válvula VB2 con el interior. Para entender mejor el funcionamiento de las válvulas, a continuación se mostraran tres de las posiciones de las válvulas de tres vías utilizadas para el manejo del controlador de flujo, para lo cual la válvula de paso (VB3) permanece cerrada:

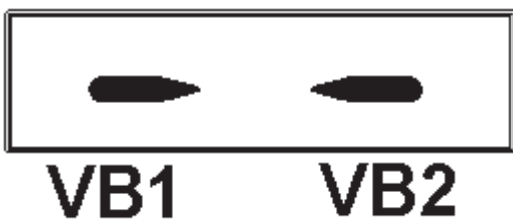


Esta primera posición nos indica que las válvulas se encuentran cerradas, por lo cual no se permite el paso del flujo a la cámara de la bureta.



Esta segunda posición nos indica una de las dos posibles formas en que podemos tomar los cambios de volumen en la bureta, para lo cual puede tener dos comportamientos que son:

- 1) Si el espécimen está siendo saturado. El flujo provendrá de la interfase aire-agua, para introducirse a la cámara de la bureta por la zona exterior y salir por la zona interior de la cámara de la bureta, y así llegar al espécimen.
- 2) Si el espécimen está sufriendo consolidación. El agua que contienen los vacíos del espécimen tiende a fluir por la zona interior de la bureta hacia la zona exterior, es decir contrario al anterior.



Esta tercera posición al igual que la anterior, permite el flujo del agua a través de la cámara de la bureta, la cual trabaja de manera similar a la anterior pero la interfase aceite- agua se mueve

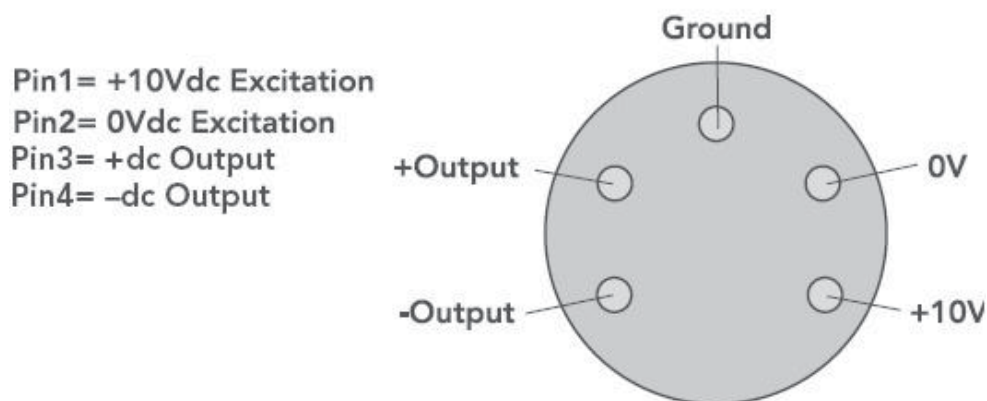
en sentido contrario. Ésta opción se utiliza cuando el cambio de volumen supera la capacidad de la bureta interior. Por lo que, para poder seguir realizando lecturas de cambio de volumen, es necesario cambiar el sentido del movimiento del fluido.

Cabe mencionar que estos cambios de volumen trabajan en conjunto con las válvulas “a y b” de la cámara triaxial, así como con la válvula V6 del panel de control.

Si las válvulas VB1 y BB2 permanecen cerradas y la válvula VB3 abierta, se permite el flujo directo del agua desde el panel de control hasta la cámara triaxial sin pasar por la bureta. Lo cual es realizado principalmente para la saturación del Sistema de Válvulas, para posteriormente montar el espécimen en la cámara triaxial e iniciar la prueba.

### III.6 Equipo de Adquisición de Datos.

Los cambios de deformación axial, esfuerzo desviador y presión de poro que sufre el espécimen a lo largo de la prueba son adquiridos por medio del sistema de adquisición del **marco de carga (MasterLoader HM-3000)**. El cual consta de cuatro entradas de instrumentación localizados en la parte posterior de la máquina (Figura III.18), en los cuales se encuentran conectados el transductor de presión de poro, el sensor de desplazamiento y la celda de carga. Para poder conectar algún equipo de medición, debe asegurarse previamente que sean compatibles los cables con la instalación eléctrica del marco (Figura III.16).



**Figura III.16.- Diagrama de instalación compatible al marco HM-3000.**

Una vez que han sido conectados los cables de cada uno de los sistemas de medición, el marco cuenta con una pantalla digital en la parte frontal (Figura III.17), la cual muestra las lecturas correspondientes a cada uno de los canales en tiempo real y con una gran precisión.



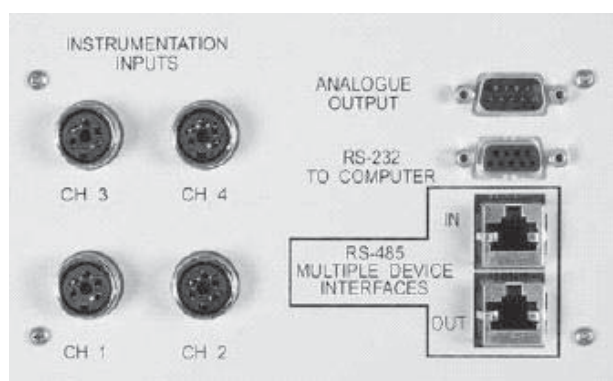
**Figura III.17.- Pantalla digital del MasterLoader HM-3000.**

En la Tabla siguiente se muestran conexiones realizadas para cada uno de los canales:

| Canal | Equipo de Medición                          |
|-------|---------------------------------------------|
| CH 1  | Celda de Carga (LOAD1 KN)                   |
| CH 2  | Censor de Desplazamiento (DISP 1 mm)        |
| CH 3  | Transductor de Presión de Poro (PRES 1 KPa) |
| CH4   | Deshabilitado                               |

**Tabla IV.1.- Conexiones de los canales del MasterLoader HM-3000.**

Otro aspecto importante del marco es que puede conectarse a una computadora, con lo cual pueden ser usados múltiples software para la adquisición de datos. Esto es logrado mediante el puerto RS-232 localizada en la parte trasera de la maquina (Fig. III.18), para lo cual es usado un cable del tipo RS-232 el cual se conecta entre la computadora y el marco.



**Figura III.18.- Entradas de instrumentación y RS-232 del panel del marco.**

### **III.7 Configuración General del Equipo de Compresión Triaxial con Medición de Presión de Poro.**

Ya que se ha descrito cada una de las partes que conforman el Equipo de las Pruebas de Compresión Triaxial con Medición de Presión de Poro (Figura III.19), a continuación en la Figura III.20 se muestra cada una de sus componentes.



**Figura III.19.- Equipo de pruebas de compresión triaxial con medición de presión de poro.**



## Capitulo IV

### Procedimiento Para la Realización de Pruebas Triaxiales

IV.1 Preparación del Espécimen.

IV.2 Preparación del Equipo.

IV.3 Montaje del Espécimen en la Cámara Triaxial.

IV.4 Pruebas Rápidas-No Drenadas (QU).

IV.5 Saturación del Espécimen.

IV.6 Consolidación del Espécimen.

IV.7 Aplicación del Esfuerzo Desviador.

IV.6.1 Pruebas Consolidadas-No Drenadas (CU).

IV.6.2 Pruebas Consolidadas-Drenadas (CD).



## Capítulo IV

### Procedimiento para la realización de pruebas triaxiales.

En este capítulo se tiene como objetivo la determinación de las relaciones esfuerzo-deformación, los parámetros de resistencia  $c'$  y  $\phi'$ , así como los esfuerzos totales y efectivos de un suelo.

Para la obtención de los conceptos anteriores hacemos uso del equipo de compresión triaxial con medición de presión de poro (Capítulo III) en el cual pueden realizarse los siguientes ensayos:

- Prueba Rápida-No Drenada (QU ó UU).
- Prueba Consolidada-No drenada (CU).
- Prueba Consolidada-Drenada (CD).

A lo largo de este capítulo, todos los movimientos de válvulas estarán referidos a la figura III.20.

#### IV.1 Preparación del Espécimen.

Para la obtención de los especímenes se tienen dos procedimientos en función del origen de la muestra de campo, que son:

- a) Especímenes Inalterados.
- b) Especímenes Remoldeados.

Para ambos casos el espécimen debe ser de forma cilíndrica cuyo diámetro depende del equipo de labrado (Figura IV.1) y deberá ser mayor de 33mm y mayor de 6 veces el tamaño máximo de sus partículas, con una altura de 2 a 2.5 veces su diámetro (ASTM D 2850-03a).

Las caras circulares deben ser planas y perpendiculares al eje vertical sin exceder de un ángulo de  $\pm 0.6^\circ$  (Norma Española UNE103402). Todos los orificios que queden durante el labrado serán rellenos con el material sobrante.



**Figura IV.1.- Equipo de Labrado.**

- a) **Especímenes Inalterados** (Figura IV.2): Para la obtención de estos especímenes primeramente es extraída una muestra inalterada de campo en forma de cubo, de 40cm. por lado. La muestra se cubre con “manta de cielo y una capa de parafina”, de tal manera que quede bien adherida a la muestra, para evitar perdidas de humedad. Una vez protegidas las caras, con una brocha se aplica otra capa de parafina en todas las caras y se coloca una tarjeta de identificación en la cara que originalmente estaba en la parte superior.

Una vez llevado el bloque a laboratorio es colocado en un cuarto húmedo, para su almacenaje. Cuando se va a empezar a trabajar la muestra, se retira el recubrimiento parcialmente y se corta un trozo que permita labrar tres especímenes representativos. El proceso de labrado debe realizarse de manera tal que el eje longitudinal del espécimen coincida con el eje vertical del suelo.



**Figura IV.2.- Muestras Inalteradas.**

b) **Especímenes Remoldeados:** Para la preparación de especímenes remoldeados, existen dos formas de obtenerlos. Para ello, es necesario conocer la humedad actual del suelo y la humedad que se desea para los especímenes y posteriormente compactarlos en un molde adecuado.

- La primera forma consiste en vaciar el material con la humedad deseada en un molde, cuyo diámetro sea mayor al del espécimen (Figura IV.3). Para ello se vaciara en tres capas y entre cada capa se dará una serie de 25 golpes con una varilla punta de bala, para posteriormente compactarlo con una prensa. Una vez obtenida la muestra se lleva al cuarto húmedo para labrar los especímenes.



**Figura IV.3.- Muestras Remoldeadas, moldeadas con prensa y labradas.**

- La segunda manera consiste en compactar directamente el espécimen en un molde con el diámetro deseado (Figura IV.4). Esta compactación se realiza sobre el pedestal de la base de la cámara, colocando la capa impermeable en el molde, para posteriormente compactar con una pistola de aire en varias capas.



**Figura IV.4.- Muestras Remoldeadas, moldeadas en el pedestal de la cámara con diámetro deseado.**

Ya que se han preparado los especímenes por cualquiera de los procedimientos anteriores, se mide inmediatamente su diámetro (es obtenido tomando el promedio de su cara superior, central e inferior), altura y peso de cada espécimen.

## **IV.2 Preparación del Equipo.**

Antes de la ejecución de cualquier ensayo es necesario verificar el correcto funcionamiento del equipo. Para ello existen revisiones que se realizan de manera periódica (1ves al año o cuando se cambia alguna parte importante) y revisiones que son efectuadas cada que se vaya a realizar un ensayo.

Las revisiones periódicas son realizadas para verificar principalmente las calibraciones de los distintos equipos de medición como son los sensores de carga, de desplazamiento y el transductor de presión.

Las revisiones rutinarias deben ser realizadas antes de montar el espécimen, para lo cual se debe verificar la ausencia de fugas de aire o agua a lo largo del equipo, así como la saturación de los conductos de agua asegurándose que no exista aire atrapado.

## **IV.3 Montaje del Especimen en la Cámara Triaxial.**

1. Como se menciona en el párrafo anterior para montar un espécimen en la cámara triaxial previamente debemos verificar la correcta saturación del equipo. Para ello, es recomendado hacer fluir un poco de agua por la línea de contrapresión hasta llegar a las piedras porosas, dejando salir el aire que pudiera estar atrapado y eliminando el agua sobrante en el equipo. También se verifica la saturación del sistema de presión de poro, lo cual se logra abriendo la llave de descarga ( $V_i$ ) y la purga de aire ( $h$ ).
2. Se coloca la capa impermeable sobre el cabezal del espécimen la cual es sujeta con un juego de ligas.

3. Se coloca el espécimen sobre las rocas porosas y se hace descender la capa impermeable sobre el espécimen hasta llegar al pedestal y es sujeta nuevamente con un juego de ligas. Para ello previamente se coloca en el pedestal un pedazo de tubo flexible con las ligas para posteriormente colocarlas sobre el pedestal e inmediatamente sacar el tubo flexible sin dañar el espécimen.
4. Debe asegurarse la verticalidad del espécimen sobre el pedestal y que la manguera de conexión con el cabezal no interfiera con el cuerpo de la cámara.
5. Se monta el resto de la cámara triaxial previendo que el vástago no esté en contacto con el cabezal del espécimen. Se comprueba la verticalidad del espécimen haciendo bajar lentamente el vástago hasta hacer contacto con el cabezal. Si no se acomoda de manera correcta se retira y corrige cualquier falla en la verticalidad que se pudiera observar, en caso contrario se continua el proceso.
6. Se satura la cámara con agua abriendo la purga de aire de la cámara (Ve) así como la válvula de alimentación del panel de control (VA), la válvula de alimentación de la cámara triaxial (V2) y la válvula de admisión de la cámara (Vj).
7. Se inyecta grasa por el cabezal de la cámara para evitar fugas por la zona del vástago.
8. Una vez saturada la cámara se cierra el desafiador (Ve), así como la válvula de alimentación de agua de la cámara triaxial (V2) y se desconecta la manguera para conectar la de alimentación de presión para iniciar el proceso de saturación.

#### IV.4 Pruebas Rápidas-No Drenadas (UU)

En este tipo de ensayos una vez montado el espécimen, se coloca la cámara triaxial en el marco de carga y se da inicio a la etapa de compresión sin saturar ni consolidar el espécimen.

1. Se acciona el plato del marco de carga hasta que el vástago de la cámara tenga un ligero contacto la celda de carga.

Nota: Tenga el cuidado de no esforzar el sensor de desplazamiento al ascender el plato del marco.

2. Se da la velocidad de falla de manera que comprenda el 1% y el 2% por minuto de la altura inicial del espécimen.
3. Se ajusta el sensor de desplazamiento de tal manera que tenga un rango adecuado para tomar las lecturas de deformación que sufra el espécimen (al menos igual al 25% de la altura del espécimen).
4. Se aplica la presión de confinamiento abriendo la válvula j y de medición de presión de poro ( $V_c$ ); se verifica que la válvula de contrapresión ( $V_a$ ) se encuentre cerrada. se encuentren cerradas.
5. Ya que se tiene el programa de adquisición de datos abierto se da inicio a la compresión del espécimen. Los cambios de deformación y la fuerza aplicada, se tomaran a intervalos de 0.2% de deformación hasta alcanzar el 1% y a cada 0.5% a partir de ese momento. En cualquier caso deben tomarse por lo menos 20 lecturas por espécimen, antes de alcanzar su falla. Las lecturas de presión de poro pueden ser tomadas en los mismos intervalos que las lecturas anteriores ó puede tomarse tan sólo la lectura en la falla del espécimen.

6. Una vez producida la falla se continúa el ensayo para asegurar que realmente se ha producido. Si se tienen una deformación plástica se detiene el ensayo al alcanzar el 20% de deformación.
7. Se finaliza la prueba deteniendo el plato del marco de carga, para posteriormente retirar la cámara triaxial del marco y poder así extraer el espécimen. Para ello se realiza el procedimiento mencionada a continuación:
  - Se comprueba que las llaves de contrapresión ( $V_a$ ), presión de confinamiento ( $V_j$ ) y de presión de poro estén cerradas ( $V_c$ ).
  - Se descarga la presión que esta ejerciéndose al transductor de presión abriendo la purga de aire ( $V_h$ ).
  - Se descarga la fuerza aplicada al espécimen, desplazando hacia abajo el plato del marco.
  - Se retiran las conexiones de la presión de confinamiento y de la contrapresión.
  - Se retira la cámara triaxial del marco y se coloca en la mesa de trabajo.
  - Se descarga la presión de confinamiento y se vacía el agua de la cámara triaxial.
  - Se desmonta la cámara y se extrae el espécimen de ella.
  - Se hace un esquema de la forma de falla del espécimen.
  - Se obtiene el peso húmedo del espécimen, así como su peso seco para posteriormente obtener su humedad.
8. Se realizan los cálculos necesarios.

En la tabla IV.1 es mostrada una hoja de datos utilizada durante el proceso de compresión, la cual es llenada como se menciona a continuación:

- a) Dimensiones iniciales del espécimen.

$L_o$  = Altura inicial del espécimen (mm).

$A_o$  = Área de la sección recta inicial del espécimen (mm<sup>2</sup>), y es calculada por la siguiente expresión:

$$A_o = \pi \times D_o^2 / 4$$

$D_o$  = Diámetro inicial de la sección (promedio de sus caras superior  $D_s$ , central  $D_c$  e inferior  $D_i$ , mm).

$V_o$  = Volumen inicial del espécimen (cm<sup>3</sup>), y es calculado por la siguiente expresión:

$$V_o = L_o \times A_o / 1000.$$

b) Deformación Axial ( $\epsilon$ ):

$$\epsilon = \Delta L / L_o$$

Donde:

$\Delta L$  = Los cambios de altura del espécimen durante su compresión.

c) Área corregida de la sección ( $A_s$ , mm<sup>2</sup>):

$$A_s = A_o / 1 - \epsilon$$

d) Esfuerzo desviador aplicado ( $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ , kPa):

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 1000 P / A_s$$

Donde:

$P$  = Carga aplicada al espécimen, N.

e) Calculo de los esfuerzos (kPa):

$$\sigma_1 = (\sigma_1 - \sigma_3) + \sigma_3$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u$$

Donde u, es la presión de poro.

- f) Se calculan los centros y los radios de los círculos de Mohr en la falla, con los esfuerzos correspondientes a la falla.

|                     | Círculos de Mohr              |                               |
|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                     | Centro                        | Radio                         |
| Esfuerzos totales   | $(\sigma_1 + \sigma_3) / 2$   | $(\sigma_1 - \sigma_3) / 2$   |
| Esfuerzos Efectivos | $(\sigma'_1 + \sigma'_3) / 2$ | $(\sigma'_1 - \sigma'_3) / 2$ |

|                         |         |   |            |              |                |                       |     |     |
|-------------------------|---------|---|------------|--------------|----------------|-----------------------|-----|-----|
| Esfuerzo Efectivo =     |         |   |            | Kpa          |                |                       |     |     |
| Presión Confinamiento = |         |   |            | Kpa          |                |                       |     |     |
| Contrapresión =         |         |   |            | Kpa          |                |                       |     |     |
| Ds (mm) =               |         |   | Ao (mm²) = |              |                |                       |     |     |
| Dc (mm) =               |         |   | Vo (cm3) = |              |                |                       |     |     |
| Di (mm) =               |         |   |            |              |                |                       |     |     |
| Do (mm) =               |         |   |            |              |                |                       |     |     |
| Lo (mm) =               |         |   |            |              |                |                       |     |     |
| Deformación Axial       |         |   | Área       | Fuerza Axial | Esf. Desviador | Esfuerzos Principales |     |     |
| Lectura                 | ΔL (mm) | ε | As (mm2)   | P (N)        | (r1-r3) Kpa    | σ1                    | σ'1 | σ'3 |

**Tabla IV.1.- Hoja utilizada durante la etapa de compresión (UU), para el registro de datos y cálculos.**

- g) Se grafica la curva Esfuerzo desviador vs. Deformación, para cada uno de los especímenes (Ver IV.7.1, paso 8h, gráfica IV.4.).

- h) Se grafican los círculos de Mohr correspondientes a la falla, así como su envolvente de falla para obtener así su parámetro de cohesión ( $c$ ) y su ángulo de fricción ( $\phi$ ), los cuales pueden ser totales ó efectivos
- i) Se calcula la resistencia al esfuerzo cortante del suelo con la ecuación:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

#### IV.5 Saturación del Espécimen.

Para poder llevar a cabo la saturación del espécimen es necesario elevar la presión de poro a un nivel suficientemente alto, para disolver el aire de la muestra como se menciona en el capítulo I. Para lograr la saturación del espécimen existen cinco métodos (Head, 1998), que son:

- Aplicando incrementos de presión de confinamiento y contrapresión.
- Una sola etapa de la contrapresión.
- Uso del “esfuerzo efectivo inicial”.
- Saturación a un contenido de agua constante.
- Saturación automática.

En esta tesis nos enfocaremos tan solo al primer procedimiento, para lo cual es necesario decidir primeramente dos factores que son:

- a) Los incrementos de la presión de confinamiento.
- b) La diferencia entre la contrapresión y la presión de confinamiento para controlar el esfuerzo efectivo al cual será sujeto el espécimen.

Refiriéndonos al primer punto los incrementos de la presión de confinamiento no excederán los 50 kPa o al esfuerzo efectivo al que se desea consolidar el espécimen (tomar el más bajo). Usualmente es utilizado este valor en incrementos hasta que  $B = 0.8$  y se incrementa a 100 kPa hasta que  $B = 0.95$ . Respecto al segundo punto la diferencia de presiones nunca será superior a la

presión de consolidación efectiva o 20 kPa (tomar menor) y no será menor de 5 kPa.

### **Procedimiento.**

1. Una vez que el espécimen ha sido montado en la cámara triaxial, se verifica que todas las válvulas estén cerradas perfectamente y es montada la cámara en una prensa o en el marco de carga triaxial. Asegurándose que se sujete vástago para que durante la saturación no sea expulsado a causa de la presión.

Se prosigue a encender el marco de carga y la computadora para poder adquirir la presión de poro inicial del espécimen, la cual es registrada en la hoja de cálculo, como se muestra en la tabla IV.2.

2. Se abren las válvulas de conexión del transductor al espécimen (Válvulas c y g).
3. Se incrementa la presión de confinamiento (R1) al primer valor deseado (50 kPa) y se abre la válvula de abastecimiento de aire del panel (V4) así como la de admisión de la cámara (Vj). Previamente de encenderse el compresor, dando la admisión de aire con ayuda del regulador de presión (RC). El incremento de la presión de confinamiento produce un incremento en la presión de poro, el cual será observado en la pantalla digital del marco de carga hasta que se equilibre y se registra como primer incremento de la presión de poro en la hoja de cálculo, como se muestra en la tabla IV.2.

### **Notas:**

- Si la presión de poro excede la presión de confinamiento indica la presencia de una fuga de agua de la cámara dentro del espécimen y será abandonada la prueba.

- Si la presión de poro no se ha estabilizado en 10 minutos se graficará la presión de poro contra el tiempo hasta interferirlo.
- Si la presión de poro disminuye, aumentar otros 50 kPa (paso 8) evitando llegar a cero.

4. Calcular el primer coeficiente de presión de poro B con la ecuación:

$$B = \Delta u / \Delta \sigma_3 = U_1 - U_0 / \Delta \sigma_3$$

5. Incrementar la contrapresión (R2) a un valor igual a la diferencia deseada (50 – 10 = 40 kPa). Espere un tiempo hasta estabilizar la bureta y registre la lectura de la bureta inicial en la hoja de cálculo.
6. Se abre la válvula de admisión de la contrapresión al cabezal del espécimen (válvulas a y b). Observe el flujo por la bureta y el incremento de la presión de poro hasta que sea virtualmente igual a la contrapresión.
7. Cuando la presión de poro es igual a la contrapresión o cuando la presión de poro y el cambio de volumen han cesado, es registrada la presión de poro y la lectura de volumen en la hoja de cálculo. Cerrar la válvula de contrapresión (válvula a).
8. Incremente la presión de confinamiento 50 kPa. Observe la presión de poro como en el paso 3 y registre el valor estable. Calcular el coeficiente B como en el paso 4.
9. Incremente la contrapresión con en el paso 5 y siga los pasos 5 al 6.
10. Repetir el paso 8, pero con una presión de confinamiento de 100 kPa cuando se halla alcanzado un coeficiente B = 0.8

11. Repetir los pasos 9 y 10 cuantas veces sea necesario, hasta que  $B = 0.95$  ó un valor apropiado al espécimen (capítulo I.4.4.1).

12. Cuando el coeficiente  $B$  es el deseado la saturación es culminada cerrando la válvula de admisión de presión de confinamiento ( $V_j$ ), la de contrapresión ( $V_a$ ) y la de medición de la presión de poro ( $V_c$ ).

13. Dibujar los coeficientes  $B$  obtenidos en cada incremento de presión de confinamiento (Presión de Confinamiento vs. Presión de Poro, Gráfica IV.1).

14. Obtener el volumen final.

Nota: Los cálculos realizados a lo largo de la saturación son realizados automáticamente si es utilizada una hoja de cálculo, de caso contrario serán realizados manualmente como se ejemplifica a continuación:

| Línea | Presión Confinamiento | Contrapresión | Presión Poro | Valor B | Cambio de Volumen de Contra Presión |               |            |
|-------|-----------------------|---------------|--------------|---------|-------------------------------------|---------------|------------|
|       | kPa                   | kPa           | kPa          |         | Antes                               | Después       | Diferencia |
| 0     | 0                     | 0             | -3.013       |         |                                     |               |            |
| 1     | 50                    | -             | 6            | 0.18026 |                                     |               |            |
| 2     | 50                    | 40            | 39           |         | 89.5                                | 89.2          | 0.3        |
| 3     | 100                   | -             | 57           | 0.36    |                                     |               |            |
| 4     | 100                   | 90            | 88           |         | 88.9                                | 88.4          | 0.5        |
| 5     | 150                   | -             | 120          | 0.64    |                                     |               |            |
| 6     | 150                   | 140           | 138          |         | 88                                  | 87.3          | 0.7        |
| 7     | 200                   | -             | 179          | 0.82    |                                     |               |            |
| 8     | 200                   | 190           | 189          |         | 86.9                                | 86.5          | 0.4        |
| 9     | 300                   | -             | 278          | 0.89    |                                     |               |            |
| 10    | 300                   | 290           | 290          |         | 86.1                                | 85.9          | 0.2        |
| 11    | 400                   | -             | 385          | 0.95    |                                     |               |            |
|       |                       |               |              |         |                                     |               |            |
|       |                       |               |              |         |                                     | $V_{Total} =$ | 2.1        |

Tabla IV.2.- Hoja de datos durante la saturación.

Como puede observarse en la tabla se encuentran registradas las lecturas de presión de confinamiento, contrapresión y presión de poro, hasta que se obtiene un valor de  $B = 0.95$ , y sus respectivos cambios de volumen para cada incremento.

En cada línea se van registrando los cambios producidos por los cambios de presión. A continuación se enunciará el llenado acorde a los pasos mencionados anteriormente:

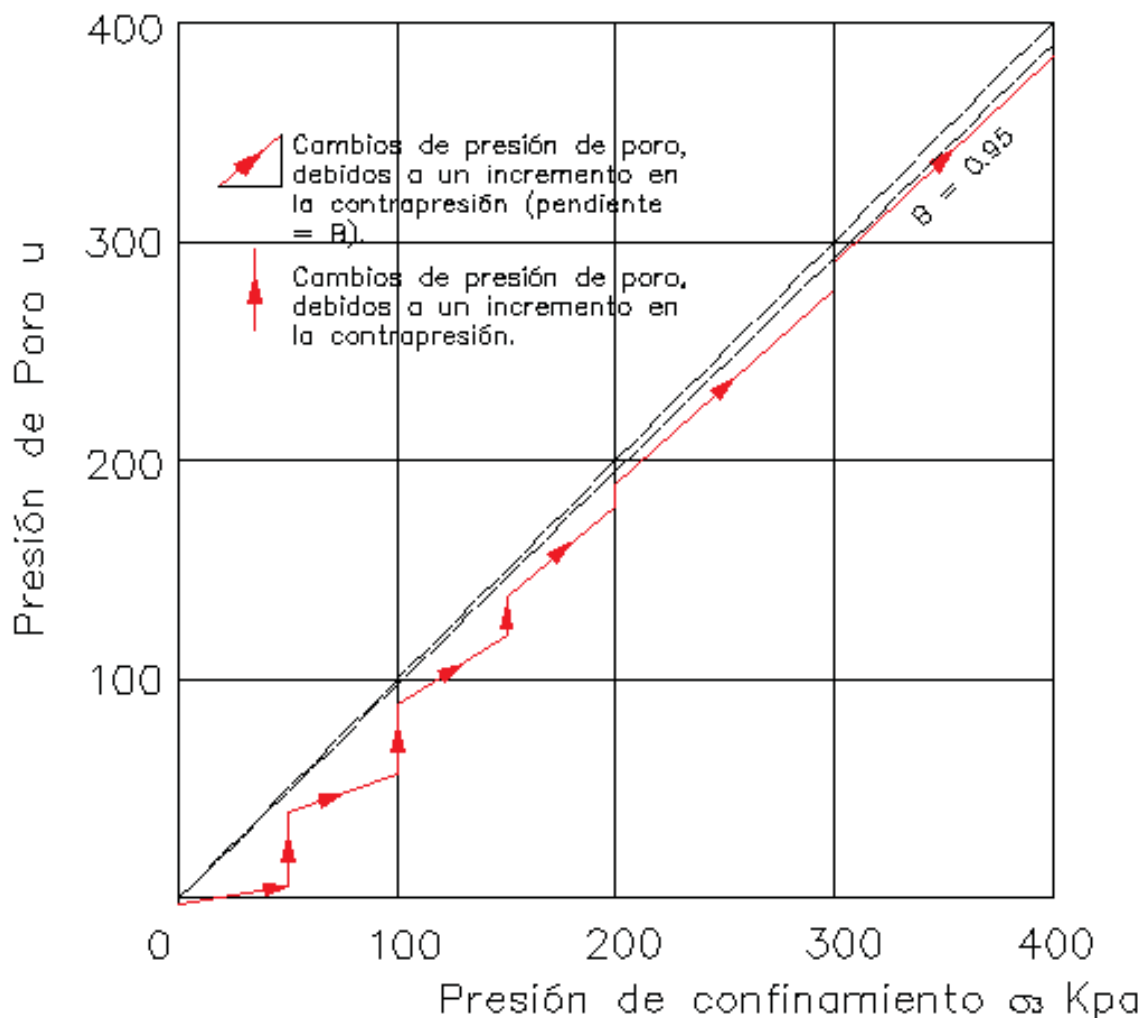
- La línea 0 corresponde a la presión de poro inicial del espécimen (paso 1). Donde aún no se realiza ningún incremento de presión de confinamiento ni contrapresión, por ello sus valores son de cero.
- La línea 1 corresponde a los cambios sufridos en el espécimen, producidos por el primer incremento de la presión de confinamiento (50 kPa, paso 3). Produciéndose un incremento en la presión de poro, el cual es estable para un valor de 6Kpa. Una vez registrados estos cambios, se prosigue al calculo del coeficiente B con la ecuación IV.1 (paso 4), para lo cual tendremos que:

$$B = (6 - (-3.013)) / (50 - 0) = 9.013 / 50 = 0.18026 \text{ (columna 5)}$$

- La línea 2 muestra los cambios producidos por el incremento de la contrapresión (40 kPa, paso 5). Como son el volumen antes de abrir las válvulas de admisión de la contrapresión; y las lecturas correspondientes a la estabilización de la presión, como son el volumen final y la presión de poro (paso 7).
- Los datos de las líneas 3 a la 8 corresponden a los pasos 8 y 9, pues como puede observarse los incrementos de confinamiento y contrapresión siguen siendo de 50 kPa hasta que  $B = 0.82$ .

- A partir de la línea 9 a la 11, los incrementos de presión son de 100 kPa (paso 8), hasta que  $B = 0.95$  (paso 11).
- En la última columna, se muestran los cambios de volumen sufridos por cada incremento de presión. Una vez terminada la prueba se obtiene el volumen total (paso 14), sumando todas las diferencias de volumen, originadas por cada incremento.

Ya que se ha realizado el llenado de la tabla, debe graficarse la curva  $u$  vs.  $\sigma_3$ , como se muestra a continuación:



**Gráfica IV.1.- Gráfica de los cambios de presión de poro, confinamiento y contrapresión durante la etapa de saturación.**

## IV.6 Consolidación del Espécimen.

Una vez que el espécimen ha sido llevado a su saturación iniciamos con su consolidación: Con lo cual se busca llevar al espécimen al estado de esfuerzos efectivos deseado antes de llevarlo a su falla. Esto debido a que el esfuerzo efectivo alcanzado en la etapa de saturación es menor a la presión requerida para la compresión. Estos ajustes pueden lograrse aumentando la presión de confinamiento, reduciendo la contrapresión o realizando una combinación de ambas. Produciendo así un exceso de presión de poro por disipar con una contrapresión apropiada.

La presión de confinamiento requerida se calcula con la ecuación:

$$\sigma_3 = \sigma'_3 + u_3$$

Donde:

$\sigma_3$ : Presión de confinamiento requerida.

$\sigma'_3$ : Esfuerzo de confinamiento efectivo deseado para la etapa de compresión.

$u_3$ : Presión de poro al final de la etapa de saturación.

Normalmente la presión de confinamiento ( $\sigma_3$ ) se aumenta, pero si la presión requerida es mayor a la presión máxima de trabajo será necesario reducir la contrapresión y se determina con expresión:

$$U_b = \sigma_{3max} - \sigma'_3$$

El valor de la contrapresión por aplicar es aceptable mientras no sea reducida a un nivel menor de presión de poro final en la saturación o 300 kPa (tomar mayor).

Si el cambio de la presión de confinamiento efectiva es muy grande, podrá consolidarse el espécimen en varias etapas.

### **Procedimiento.**

1. Verificar que las válvulas a, c y j estén cerradas e inicie el ajuste del esfuerzo efectivo requerido como se enuncio anteriormente.
2. Abra la válvula de admisión de presión de confinamiento (Vj) y la de lecturas de presión de poro (Vc). Registre la presión de poro cuando se estabilice y obtenga el nuevo valor de B.

La diferencia de la presión de poro final ( $u_i$ ) y la contrapresión ( $u_b$ ), es el exceso de presión de poro por disipar ( $u_i - u_b$ ) durante la consolidación.

3. Ponga el cronometro en cero y registre la presión de poro y el volumen como valores iniciales en la hoja de calculo (Tabla IV.5).
4. Inicie la etapa de consolidación abriendo la válvula “a”, accionando el cronometro al mismo tiempo.
5. Registre la presión de poro y los cambios de volumen a intervalos de tiempo adecuados (use los señalados en la hoja de calculo, Tabla IV.5).
6. Represente de manera gráfica los cambios de volumen contra la raíz cuadrada del tiempo ( $\Delta V$  vs.  $t^{1/2}$ , grafica IV.2) y la disipación de presión de poro contra el logaritmo del tiempo ( $(u_i - u_b)$  vs.  $\log t$ , grafica IV.3).

Se puede finalizar la etapa de consolidación cuando la disipación de la presión de poro sea del 95% o cuando se estabiliza el cambio de volumen.

7. Termine la etapa de consolidación cerrando la válvula de admisión de contrapresión (Va) y la de medición de presión de poro (Vc). Registre el

fin de la etapa midiendo la presión de poro en la base del espécimen ( $u_c$ ). El esfuerzo efectivo de consolidación ( $\sigma'_3$ ) es ahora dado por:

$$\sigma_3 = \sigma'_3 - \bar{u}$$

Donde:

$$\bar{u}: \frac{2}{3} u_c + \frac{1}{3} u_b$$

Donde:

$u_i$  = Presión de poro final.

$u_b$  = Contrapresión.

Si la presión de poro es aproximada a la contrapresión  $\bar{u}$  será obtenida, como la media aritmética:

$$\bar{u} = \frac{1}{2} (u_c + u_b)$$

8. Registre el volumen final y calcule el volumen total durante la consolidación. La consolidación del espécimen esta lista para la compresión.

#### **Determinación del Tiempo de Falla y Velocidad de Desplazamiento.**

9. De la gráfica volumen contra raíz cuadrada del tiempo ( $\Delta V$  vs.  $t^{1/2}$ , gráfica IV.2), obtenga  $t_{100}$  de la siguiente forma:

Trazar una línea recta que mejor se ajuste a la curva y que parta del punto inicial e intercepte con la línea horizontal que representa el 100% de la consolidación. El punto de intercepción será asumido como la raíz cuadrada de  $t_{100}$ , por lo cual se multiplica por sí mismo para la obtención de  $t_{100}$  (capítulo I.6.1).

10. Multiplicar el tiempo obtenido por el factor apropiado para la determinación del tiempo de prueba significativo.

El factor está en función de la presencia o ausencia de los drenes laterales y el tipo de prueba (drenada ó no drenada). Para especímenes con proporciones 2:1 (Longitud:Diámetro) los valores para cada factor son mostrados en la Tabla IV.3. Si la proporción es distinta, en pruebas drenadas se usa la ecuación I.9 y la tabla I.3; ahora bien si se tienen pruebas no drenadas se usa la tabla I.3 con la ecuación I.12 cuando son usados los drenes laterales y se usa la ecuación I.15 con la Tabla I.3 si son usados los drenes (ver Capítulo I.6.3).

| Tipo de Prueba | Sin Drenes Laterales | Con Drenes Laterales |
|----------------|----------------------|----------------------|
| CU             | 0.53                 | 1.8                  |
| CD             | 8.5                  | 14                   |

**Tabla IV.3.- Factor de falla para distintas condiciones de drenaje (Ver Tabla I.3, capítulo I.6).**

Nota: El valor de  $t_f$  no será menor de 120min, por lo tanto si el valor obtenido es menor, se propondrá un valor igual o mayor a 2hrs.

11. El tiempo calculado es usado en la ecuación siguiente para determinar la velocidad de desplazamiento:

$$V = E_f \times L / 100t_f \quad (\text{mm/min})$$

Donde:

L: La Longitud del espécimen.

$E_f$ : Una estimación del porcentaje de deformación en la falla. En la Tabla IV.4 se muestran algunas estimaciones de  $E_f$ , pero es preferible basarse en la experiencia.

| Tipo de suelo                 | Ef % para el máximo<br>esfuerzo desviador |       |
|-------------------------------|-------------------------------------------|-------|
|                               | CU                                        | CD    |
| Arcillas Inalteradas          |                                           |       |
| Normalmente Consolidadas      | 15-20                                     | 15-20 |
| Sobreconsolidadas             | 20+                                       | 4-15  |
| Arcillas Remoldeadas          | 20-30                                     | 20-25 |
| Suelos Frágiles               | 1-5                                       | 1-5   |
| Arcilla compactada con boleas |                                           |       |
| Del lado seco de su PVSM      | 3-10                                      | 4-6   |
| Del lado Húmedo de su PVSM    | 15-20                                     | 6-10  |
| Arena limosa compactada       | 8-15                                      | 10-15 |
| Arenas saturadas              |                                           |       |
| Densas                        | 25+                                       | 5-7   |
| Sueltos                       | 12-18                                     | 15-20 |

**Tabla IV.4.- Porcentajes de deformación ( $E_f$ ) sugeridos para pruebas triaxiales.**

Nota: Los cálculos realizados a lo largo de la consolidación son realizados automáticamente si es utilizada una hoja de cálculo, de caso contrario serán realizados manualmente como se ejemplifica a continuación:

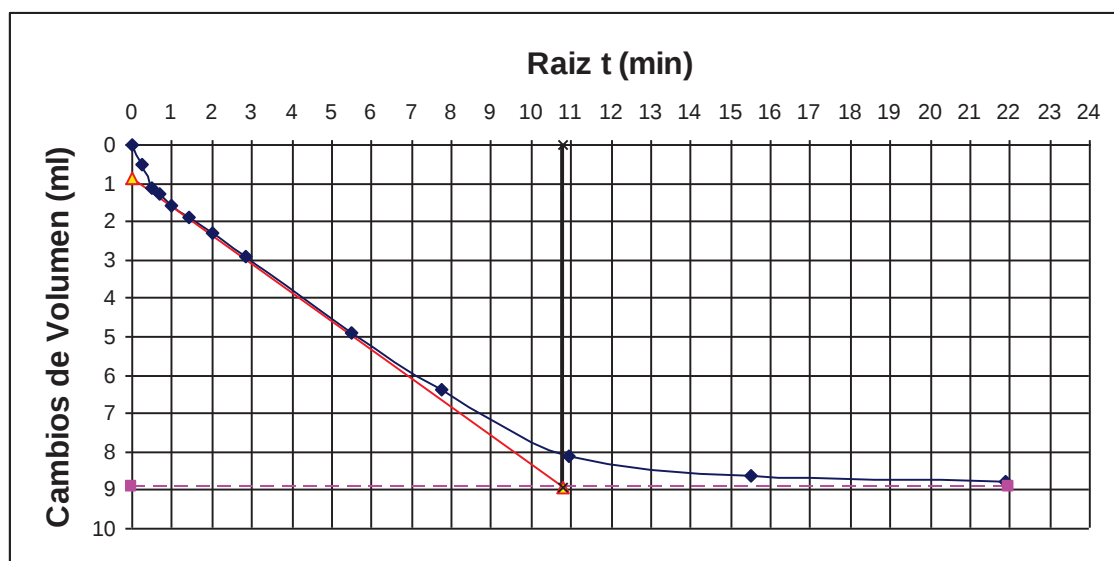
| P. Efectiva:                    | 30     | Kpa | Fecha    | Hora<br>(24:00) | Tiempo |     |     | $t^{0.5}$ | Cambio De Volumen |            | Presión De Poro (Kpa) |            |            |
|---------------------------------|--------|-----|----------|-----------------|--------|-----|-----|-----------|-------------------|------------|-----------------------|------------|------------|
| Presión de Confinamiento:       | 400    |     |          |                 | HRS    | MIN | SEG |           | Medición          | Diferencia | Medición              | Diferencia | Disipación |
| Contrapresión:                  | 370    |     | 20/01/07 | 9:00            |        |     | 0   | 0.00      | 85.9              | 0.00       | 385                   | 0.00       | 0.00       |
| Presión de Poro Equilibrada:    | 385    |     |          |                 |        |     | 4   | 0.07      | 85.4              | 0.50       | 385                   | 0.00       | 0.00       |
| Presión Por Disipar:            | 15.00  |     |          |                 |        |     | 15  | 0.25      | 84.8              | 1.10       | 385                   | 0.00       | 0.00       |
| Altura del Espécimen:           | 76     | mm  |          |                 |        |     | 30  | 0.50      | 84.6              | 1.30       | 384.9                 | 0.10       | 0.67       |
| Drenes Laterales (Si ó No):     | No     | Min |          |                 |        | 1   | 0   | 1.00      | 84.3              | 1.60       | 384.7                 | 0.30       | 2.00       |
| Factor de Tiempo:               | 0.53   |     |          |                 |        | 2   | 0   | 2.00      | 84                | 1.90       | 384                   | 1.00       | 6.67       |
| Raíz $t_{100}$ :                | 10.8   |     |          |                 |        | 4   | 0   | 4.00      | 83.6              | 2.30       | 383.5                 | 1.50       | 10.00      |
| $t_{100}$ :                     | 116.64 |     |          |                 |        | 8   | 0   | 8.00      | 83                | 2.90       | 383                   | 2.00       | 13.33      |
| $t_r$ :                         | 61.82  |     |          |                 |        | 30  | 0   | 30.00     | 81                | 4.90       | 382                   | 3.00       | 20.00      |
| Si $t_f < 120\text{min}$ , use: | 120    |     |          |                 | 1      | 0   | 0   | 60.00     | 79.5              | 6.40       | 378                   | 7.00       | 46.67      |
| Desp. de Falla Asumido Ef:      | 5      | %   |          |                 | 2      | 0   | 0   | 120.00    | 77.8              | 8.10       | 374.5                 | 10.50      | 70.00      |
| Vel. de Desplazamiento          | 0.032  |     |          |                 | 4      | 0   | 0   | 240.00    | 77.3              | 8.60       | 371                   | 14.00      | 93.33      |
|                                 |        |     |          |                 | 8      | 0   | 0   | 480.00    | 77.1              | 8.80       | 370.5                 | 14.50      | 96.67      |
|                                 |        |     |          |                 |        |     |     |           | V. Total =        |            | 8.80                  |            |            |

Tabla IV.5.- Hoja de datos durante la consolidación.

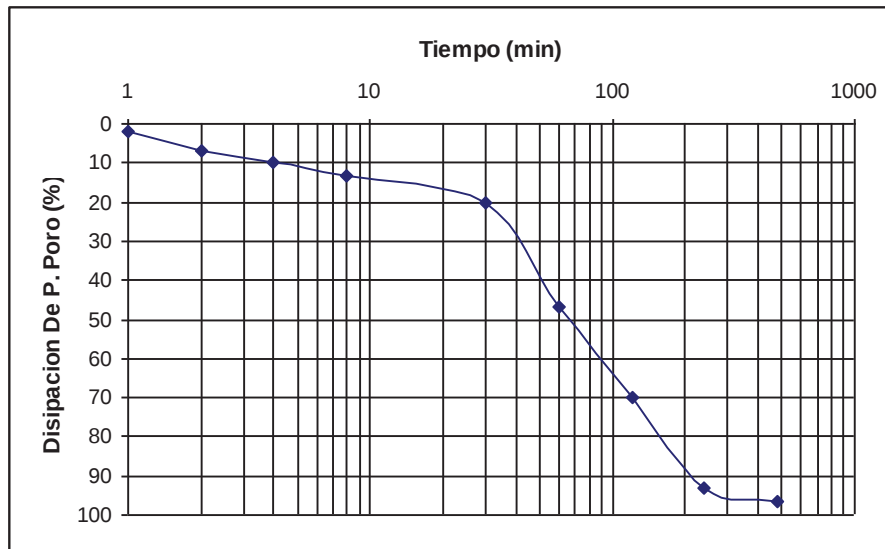
En la tabla anterior, puede observarse que en las primeras tres columnas se encuentran registrados los ajustes de presión, para tener el esfuerzo efectivo requerido para la consolidación (paso 1). Para este caso el esfuerzo efectivo es de 30 kPa ( $\sigma'_3 = \sigma_3 - u_3 = 400 - 370 = 30$ ). También puede observarse que la presión por disipar es de 15 kPa ( $u_i - u_b = 385 - 370 = 15$ , paso 2).

En las columnas siguientes, son registradas las lecturas de volumen y presión de poro que va sufriendo el espécimen en determinados intervalos de tiempo (pasos 3 y 5), para lo cual son registradas la fecha y hora de inicio de la prueba. Los cambios de volumen y presión son calculados tomando primeramente los volúmenes y las presiones en el tiempo deseado, para posteriormente calcular sus incrementos; es decir la diferencia en cada lectura más la diferencia anterior. Una vez realizados los cálculos anteriores, se prosigue a calcular la disipación de presión que va sufriendo el espécimen hasta obtener un valor mayor ó igual al 95%, con lo cual se da por terminada la consolidación y se calcula el volumen final (paso 8).

Durante los cálculos es conveniente graficar los cambios de volumen contra la raíz cuadrada del tiempo (gráfica IV.2) y la disipación de presión de poro contra el logaritmo del tiempo (gráfica IV.3, paso 6).



**Gráfica IV.2.- Cambio de volumen contra la raíz cuadrada del tiempo.**



**Gráfica IV.3.- Disipación de presión de poro contra tiempo (Escala logarítmica.**

En la gráfica IV.3 puede observarse que el espécimen ha alcanzado su consolidación en un 8.9% de su cambio de volumen y que la línea que se ajusta a la curva, intercepta con la de consolidación en un valor de  $X = 10.8$ . El cual es registrado en la tabla IV.5, para posteriormente multiplicarse por sí mismo (paso 9).

Ya que se ha obtenido el valor correspondiente de  $t_{100}$ , es necesario afectarlo por el factor de tiempo correspondiente a la condición de prueba (paso 10). Para este caso se tiene una prueba CU sin drenes laterales, por lo que el factor será de 0.53 y el tiempo estimado de falla será de 61.82min ( $0.53 \times 10.8^2 = 61.82$ ), por lo tanto se propondrá un tiempo de 120min, puesto que no se pueden tener tiempos menores de 120min.

Por último se calcula la velocidad de desplazamiento del plato con que se aplicara el esfuerzo desviador (paso 11). Para ello es necesario conocer la longitud del espécimen y proponer el porcentaje deformación, en este caso la longitud es de 76mm y la deformación ha sido asumida del 5%, por lo cual la velocidad es de 0.032mm/min. ( $5 \times 76 / 100 \times 120 = 0.032$ ).

## **IV.7 Aplicación del Esfuerzo Desviador.**

Si las etapas de saturación y consolidación fueron realizadas fuera del marco de compresión triaxial se coloca la cámara sobre el plato del marco. De lo contrario se prosigue al paso 1 de la etapa de compresión según el tipo de ensayo deseado (CU ó CD).

Una vez colocada la cámara triaxial sobre el plato del marco triaxial proseguimos a abrir el software de adquisición de datos. Para así poder obtener a lo largo de la etapa de compresión los cambios de presión de poro, carga aplicada y deformación del espécimen en el ensayo.

### **IV.7.1 Pruebas Consolidadas-No Drenadas (CU)**

En estos ensayos durante la etapa de compresión, se mantiene constante la presión de confinamiento y no se permite el drenaje, por lo cual no existen cambios de volumen en el espécimen a lo largo de la etapa. Durante este proceso se miden los cambios de la presión de poro, deformación axial y carga aplicada. La velocidad de deformación aplicada es lo suficientemente lenta para asegurar que la presión de poro sea constante en todo el espécimen.

1. Se acciona el plato del marco de carga hasta que el vástago de la cámara tenga un ligero contacto la celda de carga.

Nota: Al momento de maniobrar el plato para el ajuste de la cámara con la celda de carga se debe tener cuidado con el censor de desplazamiento puesto que al ascender el plato, también asciende la plataforma donde descansa el censor, con lo cual puede ser que este sea aplastado esforzándolo a trabajar más de lo permitido y dañándolo.

2. Se ajusta la velocidad de avance del plato de tal manera que sea la más próxima al valor calculado en el paso 11.

3. Se ajusta el censor de desplazamiento de tal manera que tenga un rango adecuado para tomar las lecturas de deformación que sufra el espécimen (al menos igual al 25% de la altura del espécimen).
4. Se comprueba que la llave de la contrapresión ( $V_a$ ) esté cerrada y que las válvulas de presión de confinamiento ( $V_j$ ) y de medición de presión de poro ( $V_c$ ) se encuentren abiertas.
5. Ya que se tiene el programa de adquisición de datos abierto se da inicio a la compresión del espécimen. Los cambios de deformación y la fuerza aplicada, se tomaran a intervalos de 0.2% de deformación hasta alcanzar el 1% y a cada 0.5% a partir de ese momento. En cualquier caso deben tomarse por lo menos 20 lecturas por espécimen, antes de alcanzar su falla.
6. Una vez producida la falla se continúa el ensayo para asegurar que realmente se ha producido. Si se tiene una deformación plástica se detiene el ensayo al alcanzar el 20% de deformación.
7. Se finaliza la prueba deteniendo el plato del marco de carga, para posteriormente retirar la cámara triaxial del marco y poder así extraer el espécimen. Para ello se deben realizar las siguientes operaciones.
  - Se comprueba que las llaves de contrapresión ( $V_a$ ), presión de confinamiento ( $V_j$ ) y de presión de poro estén cerradas ( $V_c$ ).
  - Se descarga la presión que esta ejerciéndose al transductor de presión abriendo la purga de aire ( $V_h$ ).
  - Se descarga la fuerza aplicada al espécimen, desplazando hacia abajo el plato del marco.
  - Se retiran las conexiones de la presión de confinamiento y de la contrapresión.
  - Se retira la cámara triaxial del marco y se coloca en la mesa de trabajo.

- Se descarga la presión de confinamiento y se vacía el agua de la cámara triaxial.
- Se desmonta la cámara y se extrae el espécimen de ella.
- Se hace un esquema de la forma de falla del espécimen.
- Se obtiene el peso húmedo del espécimen, así como su peso seco para posteriormente obtener su humedad.

8. Se realizan los cálculos necesarios.

Los cambios de deformación y carga aplicada, son adquiridos de manera automática por el marco de carga (tabla IV.5), los cuales son pasados a una hoja de calculo (tabla IV.6), para obtener de manera automática los cálculos necesarios.

| Read<br>Number/Numero<br>de lectura | System<br>Time/Tiempo de<br>prueba | Elapsed<br>Time/Intervalo de<br>tiempo | LOAD 1 /<br>Carga | DISP 1 /<br>Desplazamiento | Engineering3 | Engineering4 |
|-------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------|-------------------|----------------------------|--------------|--------------|
| 0                                   | 05:37:55 PM                        | 00:00:00                               | 0.000             | 100.000                    | 204.000      | 0            |
| 1                                   | 05:38:05 PM                        | 00:00:10                               | 12.000            | 110.000                    | 207.000      | 0            |
| 2                                   | 05:38:15 PM                        | 00:00:20                               | 34.000            | 120.000                    | 214.000      | 0            |
| 3                                   | 05:38:25 PM                        | 00:00:30                               | 92.000            | 140.000                    | 228.000      | 0            |
| 4                                   | 05:38:35 PM                        | 00:00:40                               | 116.000           | 160.000                    | 242.000      | 0            |
| 5                                   | 05:38:45 PM                        | 00:00:50                               | 132.000           | 180.000                    | 252.000      | 0            |
| 6                                   | 05:38:55 PM                        | 00:01:00                               | 144.000           | 200.000                    | 260.000      | 0            |
| 7                                   | 05:39:05 PM                        | 00:01:10                               | 156.000           | 220.000                    | 268.000      | 0            |
| 8                                   | 05:39:15 PM                        | 00:01:20                               | 166.000           | 240.000                    | 274.000      | 0            |
| 9                                   | 05:39:25 PM                        | 00:01:30                               | 173.000           | 260.000                    | 280.000      | 0            |
| 10                                  | 05:39:35 PM                        | 00:01:40                               | 180.000           | 280.000                    | 283.000      | 0            |
| 11                                  | 05:39:45 PM                        | 00:01:50                               | 189.000           | 300.000                    | 287.000      | 0            |
| 12                                  | 05:39:55 PM                        | 00:02:00                               | 195.000           | 320.000                    | 290.000      | 0            |
| 13                                  | 05:40:05 PM                        | 00:02:10                               | 203.000           | 340.000                    | 294.000      | 0            |
| 14                                  | 05:40:15 PM                        | 00:02:20                               | 209.000           | 360.000                    | 296.000      | 0            |

**Tabla IV.6.- Hoja de adquisición de datos dada por el marco de carga (HM-3000).**

Si no se cuenta con un marco de adquisición de datos, es necesario registrar de manera manual los cambios de deformación y esfuerzo desviador. En la

tabla IV.7 es mostrada una hoja de datos utilizada durante el proceso de compresión, la cual es llenada como se menciona a continuación:

a) Dimensiones del espécimen al final del proceso de consolidación:

$$\begin{aligned}V_c &= V_o - \Delta V_c \\A_c &= A_o (1 - 2 \Delta V_c / 3V_o) \\L_c &= L_o (1 - \Delta V_c / 3V_o)\end{aligned}$$

Donde:

$L_o$  = Altura inicial del espécimen (mm).

$A_o$  = Área de la sección recta inicial del espécimen (mm<sup>2</sup>), y es calculada por la siguiente expresión:

$$A_o = \pi \times D_o^2 / 4$$

Donde:

$D_o$  = Diámetro inicial de la sección (promedio de sus caras superior, central e inferior, mm).

$V_o$  = Volumen inicial del espécimen (cm<sup>3</sup>), y es calculado por la siguiente expresión:

$$V_o = L_o \times A_o / 1000.$$

$V_c$  = Volumen del espécimen al final de su consolidación.

$\Delta V_c$  = Cambio de volumen total producido durante la consolidación.

$A_c$  = Área de la sección recta del espécimen al final de su consolidación.

$L_c$  = Altura del espécimen al final de la consolidación (mm).

b) Deformación Axial ( $\epsilon$ ):

$$\epsilon = \Delta L / L_c$$

Donde:

$\Delta L$  = Los cambios de altura del espécimen durante la aplicación del desviador.

c) Área corregida de la sección ( $A_s$ , mm<sup>2</sup>):

$$A_s = A_c / 1 - \varepsilon$$

d) Esfuerzo desviador aplicado ( $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ , kPa):

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 1000 P / A_s$$

e) Cálculo de los esfuerzos (kPa):

$$\sigma_1 = (\sigma_1 - \sigma_3) + \sigma_3$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u$$

Donde  $u$ , es la presión de poro.

f) Se calculan los centros y los radios de los círculos de Mohr en la falla, para lo cual los valores de los esfuerzos totales y efectivos serán los correspondientes a la falla.

|                     | Círculos de Mohr              |                               |
|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                     | Centro                        | Radio                         |
| Esfuerzos totales   | $(\sigma_1 + \sigma_3) / 2$   | $(\sigma_1 - \sigma_3) / 2$   |
| Esfuerzos Efectivos | $(\sigma'_1 + \sigma'_3) / 2$ | $(\sigma'_1 - \sigma'_3) / 2$ |

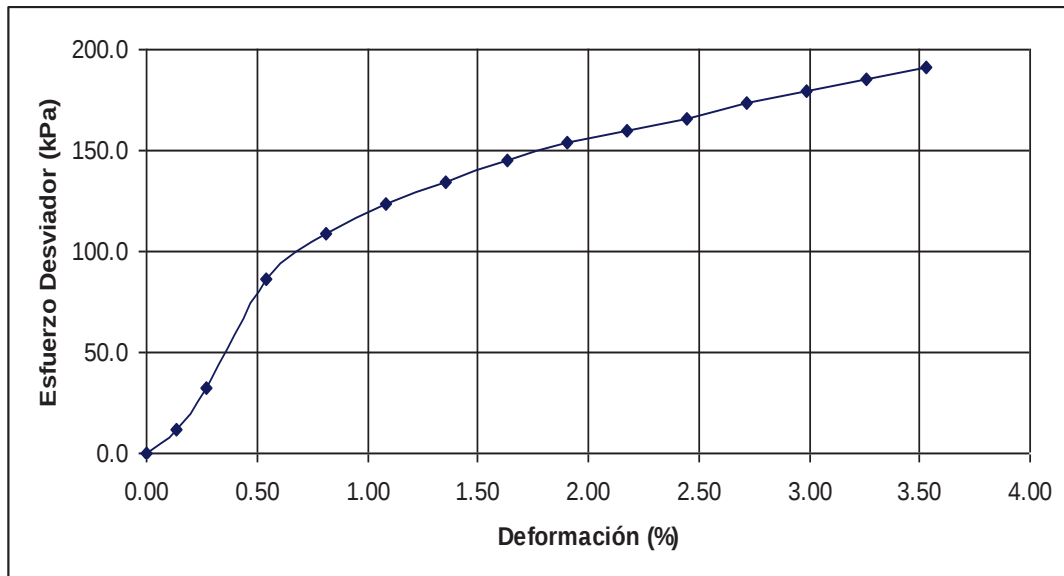
g) Se calcula el coeficiente de presión de poro  $A$ :

$$A = (u - u_o) / (\sigma_1 - \sigma_3)$$

|                   |         |             |          |            |         |                              |       |               |                       |       |           |            |
|-------------------|---------|-------------|----------|------------|---------|------------------------------|-------|---------------|-----------------------|-------|-----------|------------|
| Ds (mm) =         | 38.1    | Ao (mm²) =  | 1134.11  | Vc (cm³) = | 77.62   | Esfuerzo Efectivo =          | 30    | Kpa           |                       |       |           |            |
| Dc (mm) =         | 37.9    | Vo (cm³) =  | 86.42    | Ac (mm²) = | 1057.12 | Presión Confinamiento (σ₃) = | 400   | Kpa           |                       |       |           |            |
| Di (mm) =         | 38      | ΔVc (cm³) = | 8.80     | Lc (mm) =  | 73.61   | Contrapresión =              | 370   | Kpa           |                       |       |           |            |
| Do (mm) =         | 38      |             |          |            |         |                              |       |               |                       |       |           |            |
| Lo (mm) =         | 76.2    |             |          |            |         |                              |       |               |                       |       |           |            |
| Deformación Axial |         | Área        |          | Fza. Axial |         | Presión Poro                 |       | Esf.          | Esfuerzos Principales |       | Coeficien |            |
| Lectura           | ΔL (mm) | ε           | As (mm²) | P (N)      | u       |                              | u-u0  | (σ₁ - σ₃) Kpa | σ₁                    | σ'₁   | σ'₃       | u-u0 / (σ₁ |
| 100.00            | 0.00    | 0.00        | 1057.12  | 0.00       | 204.00  |                              | 0.00  | 0.0           | 400.0                 | 196.0 | 196.0     |            |
| 110.00            | 10.00   | 0.14        | 1058.56  | 12.00      | 207.00  |                              | 3.00  | 11.3          | 411.3                 | 204.3 | 193.0     | 0.265      |
| 120.00            | 20.00   | 0.27        | 1060.00  | 34.00      | 214.00  |                              | 10.00 | 32.1          | 432.1                 | 218.1 | 186.0     | 0.312      |
| 140.00            | 40.00   | 0.54        | 1062.90  | 92.00      | 228.00  |                              | 24.00 | 86.6          | 486.6                 | 258.6 | 172.0     | 0.277      |
| 160.00            | 60.00   | 0.82        | 1065.81  | 116.00     | 242.00  |                              | 38.00 | 108.8         | 508.8                 | 266.8 | 158.0     | 0.349      |
| 180.00            | 80.00   | 1.09        | 1068.74  | 132.00     | 252.00  |                              | 48.00 | 123.5         | 523.5                 | 271.5 | 148.0     | 0.389      |
| 200.00            | 100.00  | 1.36        | 1071.68  | 144.00     | 260.00  |                              | 56.00 | 134.4         | 534.4                 | 274.4 | 140.0     | 0.417      |
| 220.00            | 120.00  | 1.63        | 1074.64  | 156.00     | 268.00  |                              | 64.00 | 145.2         | 545.2                 | 277.2 | 132.0     | 0.441      |
| 240.00            | 140.00  | 1.90        | 1077.62  | 166.00     | 274.00  |                              | 70.00 | 154.0         | 554.0                 | 280.0 | 126.0     | 0.454      |
| 260.00            | 160.00  | 2.17        | 1080.61  | 173.00     | 280.00  |                              | 76.00 | 160.1         | 560.1                 | 280.1 | 120.0     | 0.475      |
| 280.00            | 180.00  | 2.45        | 1083.62  | 180.00     | 283.00  |                              | 79.00 | 166.1         | 566.1                 | 283.1 | 117.0     | 0.476      |
| 300.00            | 200.00  | 2.72        | 1086.65  | 189.00     | 287.00  |                              | 83.00 | 173.9         | 573.9                 | 286.9 | 113.0     | 0.477      |
| 320.00            | 220.00  | 2.99        | 1089.69  | 195.00     | 290.00  |                              | 86.00 | 178.9         | 578.9                 | 288.9 | 110.0     | 0.481      |
| 340.00            | 240.00  | 3.26        | 1092.75  | 203.00     | 294.00  |                              | 90.00 | 185.8         | 585.8                 | 291.8 | 106.0     | 0.484      |
| 360.00            | 260.00  | 3.53        | 1095.83  | 209.00     | 296.00  |                              | 92.00 | 190.7         | 590.7                 | 294.7 | 104.0     | 0.482      |

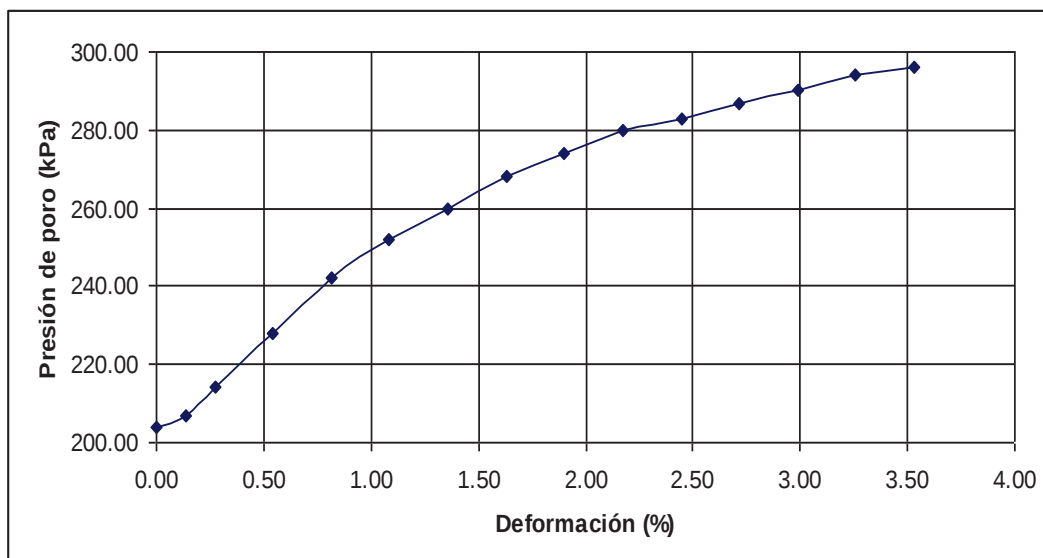
Tabla IV.7.- Hoja utilizada durante la etapa de compresión, para el registro de datos y cálculo de esfuerzos.

- h) Se grafica la curva Esfuerzo desviador vs. Deformación, para cada uno de los especímenes:



**Gráfica IV.4.- Curva Esfuerzo Desviador vs. Deformación.**

- i) Graficar la curva Presión de Poro vs. Deformación.



**Gráfica IV.5.- Curva Presión de Poro vs. Deformación.**

- j) Obtener el parámetro de cohesión ( $c$ ) y su ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) del suelo, a partir de los círculos de Mohr correspondientes a la falla, los cuales pueden ser totales o efectivos.

k) Se calcula la resistencia al esfuerzo cortante del suelo con la ecuación:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

#### IV.7.2 Pruebas Consolidadas-Drenadas (CD).

En este tipo de ensayos en la etapa de compresión se mantiene constante la presión de confinamiento y es permitido el drenaje del espécimen. Durante todo el proceso es medido el volumen de agua que entra o sale del espécimen.

1. Se acciona el plato del marco de carga hasta que el vástago de la cámara tenga un ligero contacto la celda de carga.
2. Se ajusta la velocidad de avance del plato de tal manera que sea la más próxima al valor calculado en el paso 11. Es importante mencionar que la velocidad para este tipo de ensayos es muy pequeña, y muchas veces no es posible realizar este tipo de ensayos, pero la velocidad del marco de carga es de 0.000001 a 75mm/min.
3. Se ajusta el sensor de desplazamiento de tal manera que tenga un rango adecuado para tomar las lecturas de deformación que sufra el espécimen (al menos igual al 25% de la altura del espécimen).
4. Se comprueba que las válvulas de contrapresión (Va), de presión de confinamiento (Vj) y de medición de presión de poro (Vc) se encuentren abiertas.
5. Ya que se tiene el programa de adquisición de datos abierto se da inicio a la compresión del espécimen. Los cambios de deformación, volumen y la fuerza aplicada, se tomaran a intervalos de 0.2% de deformación hasta alcanzar el 1% y a cada 0.5% a partir de ese momento. En cualquier caso deben tomarse por lo menos 20 lecturas por espécimen, antes de alcanzar su falla.

6. Una vez producida la falla se continúa el ensayo para asegurar que realmente se ha producido. Si se tiene una deformación plástica se detiene el ensayo al alcanzar el 20% de deformación.
7. Se finaliza la descarga y desmonta la cámara para extraer el espécimen como en el paso 7 para las pruebas CU.
8. Se realizan los cálculos necesarios

En la tabla IV.8 es mostrada una hoja de datos utilizada durante el proceso de compresión, la cual es llenada como se menciona a continuación:

- a) Dimensiones del espécimen al final de su consolidación (Ver IV.7.1, paso 8a).
- b) Deformación Axial (Ver IV.7.1, paso 8b):
- c) Deformación volumétrica, debida a la compresión:

$$\varepsilon_v = \Delta V / V_c$$

Donde:

$\Delta V$  = Cambio de volumen del espécimen, debido a la compresión.

- d) Área corregida de la sección ( $A_s$ , mm<sup>2</sup>):

$$A_s = (1 - \varepsilon_v / 1 - \varepsilon) * A_c$$

- e) Esfuerzo desviador aplicado (Ver IV.7.1, paso 8d):
- f) Calculo de los esfuerzos (Ver IV.7.1, paso 8e):

- g) Se calculan los centros y los radios de los círculos de Mohr en la falla, con los esfuerzos correspondientes a la falla.

| Círculos de Mohr    |                               |                               |
|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Centro              |                               | Radio                         |
| Esfuerzos Efectivos | $(\sigma'_1 + \sigma'_3) / 2$ | $(\sigma'_1 - \sigma'_3) / 2$ |

|                         |  |             |     |            |  |
|-------------------------|--|-------------|-----|------------|--|
| Esfuerzo Efectivo =     |  |             | Kpa |            |  |
| Presión Confinamiento = |  |             | Kpa |            |  |
| Contrapresión =         |  |             | Kpa |            |  |
| Ds (mm) =               |  | Ao (mm²) =  |     | Vc (cm3) = |  |
| Dc (mm) =               |  | Vo (cm3) =  |     | Ac (mm2) = |  |
| Di (mm) =               |  | ΔVc (cm3) = |     | Lc (mm) =  |  |
| Do (mm) =               |  |             |     |            |  |
| Lo (mm) =               |  |             |     |            |  |

| Deformación Axial |                 |               | Área                  | Fuerza Axial | Volumen      |            |                 | Esf. Desviador | Esfuerzos Principales |             |             |
|-------------------|-----------------|---------------|-----------------------|--------------|--------------|------------|-----------------|----------------|-----------------------|-------------|-------------|
| Lectura           | $\Delta L$ (mm) | $\varepsilon$ | As (mm <sup>2</sup> ) | P (N)        | Lectura (ml) | Diferencia | $\varepsilon_v$ | (r1-r3) Kpa    | $\sigma_1$            | $\sigma'_1$ | $\sigma'_3$ |
|                   |                 |               |                       |              |              |            |                 |                |                       |             |             |
|                   |                 |               |                       |              |              |            |                 |                |                       |             |             |
|                   |                 |               |                       |              |              |            |                 |                |                       |             |             |
|                   |                 |               |                       |              |              |            |                 |                |                       |             |             |

**Tabla IV.8.- Hoja utilizada durante la etapa de compresión, para el registro de datos y cálculo de esfuerzos.**

En la tabla IV.8 a diferencia de la IV.7 no se registra la presión de poro, puesto que será igual a la presión al final de la etapa de consolidación, sin embargo son registrados los cambios de volumen.

- h) Se grafica la curva Esfuerzo desviador vs. Deformación, para cada uno de los especímenes (Ver IV.6, paso 8h, grafica IV.4.).
- i) Graficar la curva Cambio de Volumen (eje Y) vs. Deformación (eje X).

- j) Se grafican los círculos de Mohr correspondientes a la falla, así como su envolvente de falla para obtener así su parámetro de cohesión ( $c$ ) y su ángulo de fricción ( $\phi$ ), los cuales pueden ser totales ó efectivos
- k) Se calcula la resistencia al esfuerzo cortante del suelo con la ecuación:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

## **BIBLIOGRAFIA**

1. ASTM D2850-03a.
2. González de Vallejo L. I. (2002), Ingeniería Geológica, Editorial Prentice Hall.
3. Head K. H. (1998), Manual of Soil Laboratory Testing, II y II, Editorial WILEY.
4. Juárez B. E. y Rico R. A. (1991), Mecánica de Suelos I, Editorial Limusa.
5. Norma Española UNE103402-98.
6. Pérez A. P. H. (1992), Pruebas Triaxiales Con Medición de Presión de Poro en Especímenes Inalterados. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil. UMSNH.