



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

A LOS ASISTENTES A LOS CURSOS

Las autoridades de la Facultad de Ingeniería, por conducto del jefe de la División de Educación Continua, otorgan una constancia de asistencia a quienes cumplan con los requisitos establecidos para cada curso.

El control de asistencia se llevará a cabo a través de la persona que le entregó las notas. Las inasistencias serán computadas por las autoridades de la División, con el fin de entregarle constancia solamente a los alumnos que tengan un mínimo de 80% de asistencias.

Pedimos a los asistentes recoger su constancia el día de la clausura. Estas se retendrán por el periodo de un año, pasado este tiempo la DECFI no se hará responsable de este documento.

Se recomienda a los asistentes participar activamente con sus ideas y experiencias, pues los cursos que ofrece la División están planeados para que los profesores expongan una tesis, pero sobre todo, para que coordinen las opiniones de todos los interesados, constituyendo verdaderos seminarios.

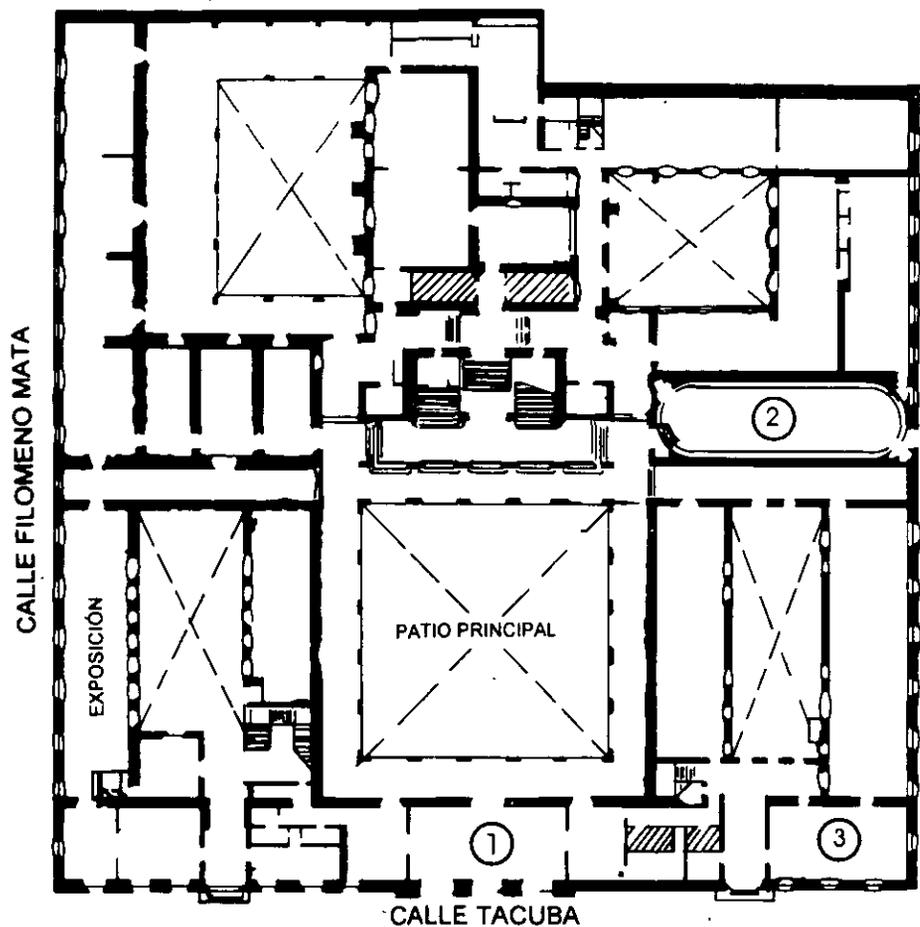
Es muy importante que todos los asistentes llenen y entreguen su hoja de inscripción al inicio del curso, información que servirá para integrar un directorio de asistentes, que se entregará oportunamente.

Con el objeto de mejorar los servicios que la División de Educación Continua ofrece, al final del curso deberán entregar la evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos.

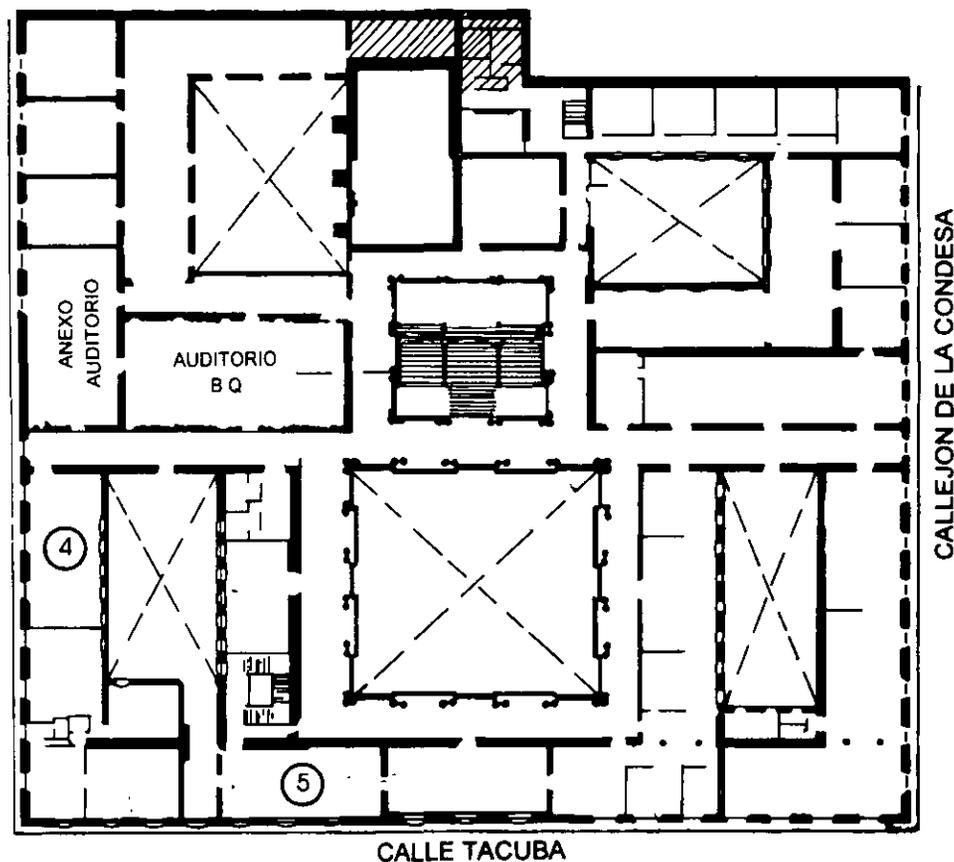
Se recomienda llenar dicha evaluación conforme los profesores impartan sus clases, a efecto de no llenar en la última sesión las evaluaciones y con esto sean más fehacientes sus apreciaciones.

**Atentamente
División de Educación Continua.**

PALACIO DE MINERIA

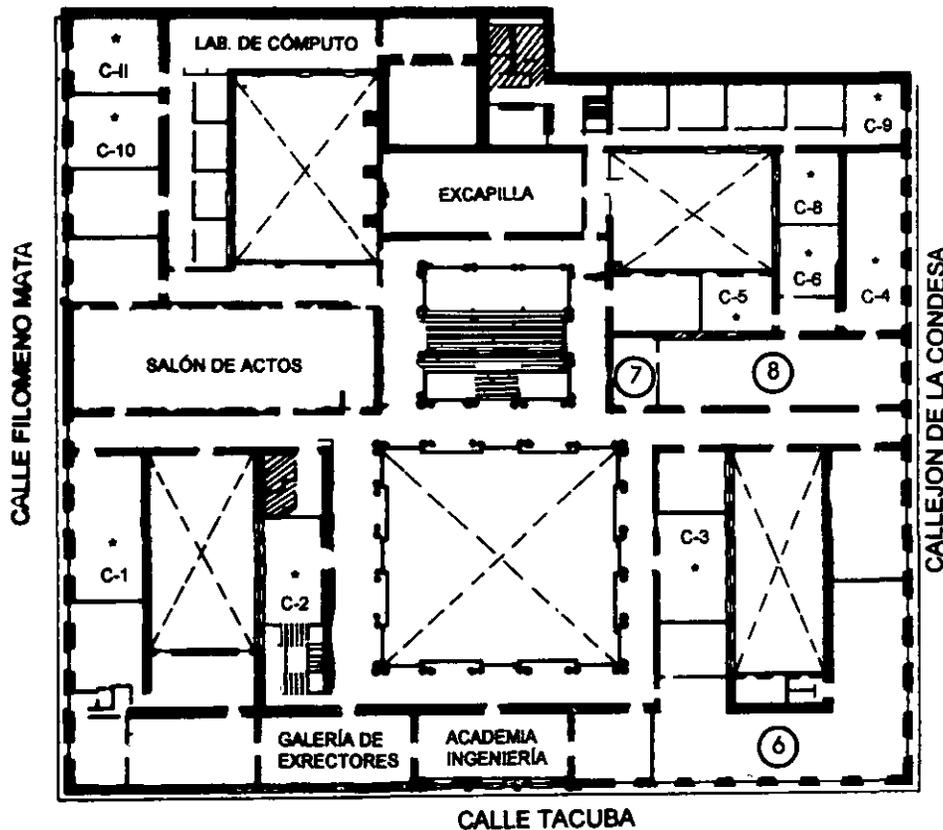


PLANTA BAJA



MEZZANINNE

PALACIO DE MINERIA



GUÍA DE LOCALIZACIÓN

1. ACCESO
2. BIBLIOTECA HISTÓRICA
3. LIBRERÍA UNAM
4. CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN "ING. BRUNO MASCANZONI"
5. PROGRAMA DE APOYO A LA TITULACIÓN
6. OFICINAS GENERALES
7. ENTREGA DE MATERIAL Y CONTROL DE ASISTENCIA
8. SALA DE DESCANSO

SANITARIOS

* AULAS

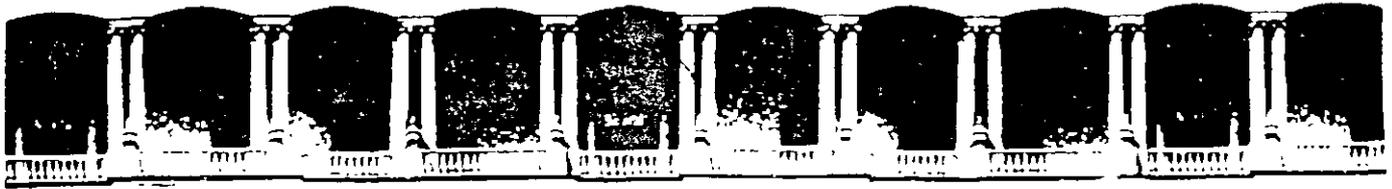
1er. PISO



DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERÍA U.N.A.M.
CURSOS ABIERTOS

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA





**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS I

TEMA

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

**CONFERENCISTA
DR. RIGOBERTO RIVERA CONSTANTINO
PALACIO DE MINERÍA
MAYO 2000**

GRANULOMETRIA DE LOS SUELOS

Se denomina distribución granulométrica de un suelo a la división del mismo en diferentes fracciones, seleccionadas por el tamaño de sus partículas componentes; las partículas de cada fracción se caracterizan porque su tamaño se encuentra comprendido entre un valor máximo y un valor mínimo, en forma correlativa para las distintas fracciones, de tal modo que el máximo de una fracción es el mínimo de la que sigue correlativamente. La separación en fracciones se hace sencillamente por mallas, cuando es posible el cribado; pero en suelos de grano muy pequeño, que forman grumos, deben adaptarse procedimientos bastante más complicados para separar las partículas individuales y ello da lugar a resultados mucho más confusos, en los que, como se verá, para lograr las fracciones constituyentes ha de recurrirse a hipótesis no muy satisfactorias, llegándose a resultados finales bastante dudosos.

En suelos gruesos (gravas, arenas y limos no plásticos), de estructura simple, la característica más importante para definir su resistencia es la compacidad; la angulosidad de los granos y la orientación de las partículas juegan también un papel importante, aunque menor. Evidentemente, cualquier análisis por mallas no da ninguna información sobre estos aspectos. La compresibilidad de estos suelos, por otra parte, aunque también depende fundamentalmente de su estructuración y compacidad, se ve influida en bastante mayor grado por la granulometría, según ha puesto de manifiesto la investigación moderna, como se verá más adelante. Han resultado decepcionantes los esfuerzos realizados hasta el presente para establecer alguna correlación entre la curva granulométrica y la permeabilidad de los suelos.

Se ha dicho que los suelos gruesos con amplia gama de tamaños (bien graduados) se compactan mejor, para una misma energía de compactación, que los suelos muy uniformes (mal graduados). Esto sin duda es cierto, pues, sobre todo con vibrado, las partículas más chicas pueden acomodarse en los huecos entre las partículas más grandes, adquiriendo el conjunto una mayor compacidad. Sin embargo, la relación entre la granulometría y facilidad de compactación no ha podido pasar de una correlación cualitativa tan vaga como la que queda enunciada, por lo cual en estudios para compactación de suelos poco o ningún provecho puede obtenerse de la curva granulométrica de los suelos gruesos. Mucho más difíciles de establecer son las propiedades mecánicas de interés ingenieril de los suelos finos tradicionalmente llamados cohesivos (arcillas y limos plásticos). Dependen de un número mucho mayor de conceptos que las de los suelos gruesos y, son pena de caer en confusión, tal estudio no puede ser abordado en esta etapa de la presentación de conceptos de la mecánica de suelos. Baste decir (y el lector tendrá ocasión de comprobarlo más adelante) que ninguna de las circunstancias que definen las propiedades mecánicas de un suelo fino está descrita por la distribución granulométrica de dicho suelo. En mucho mayor medida de lo que sucede en suelos gruesos, el conocimiento de la distribución granulométrica resulta estéril en el caso de los suelos finos.

Demostrándose una vez más la fuerza de la tradición y la costumbre, todavía es común en la actualidad que muchas especificaciones referentes al uso o rechazo de los materiales para la construcción de Vías Terrestres contengan preceptos granulométricos en mayor o menor grado. Esta situación ha de verse como indeseable pues, debe insistirse, no es casi nunca el tamaño de las partículas de un suelo fino el que define su comportamiento mecánico, y una norma de aceptación o rechazo basada en tal criterio corre el riesgo de aceptar lo malo y

rechazar lo que sería mejor. Por ejemplo, una arcilla caolinítica, relativamente inerte ante el agua y que para muchos usos resultaría perfectamente aprovechable, puede tener una distribución granulométrica análoga a una arcilla montmorilonítica, quizá con materia orgánica, sumamente activa, que constituye en casi todos los casos un suelo que debe rechazarse para su uso en la construcción de vías terrestres.

Una de las razones que han contribuido a la difusión de las técnicas granulométricas es que, en cierto sentido, la distribución granulométrica proporciona un criterio de clasificación. Los conocimientos términos arcilla, limo, arena y grava tienen tal origen y un suelo se clasificaba como arcilla o como arena según tuviera tal o cual tamaño máximo. La necesidad de un sistema de Clasificación de Suelos no es discutible, pero el ingeniero ha de buscar uno en que el criterio de clasificación le sea útil, es decir, en el que se clasifique a los suelos de acuerdo con sus propiedades ingenieriles fundamentales y no según el tamaño de sus partículas, que poco significa.

De todos modos, como en muchas cuestiones de aplicación de sus técnicas, el ingeniero actual en vías terrestres hace un uso todavía relativamente frecuente de las curvas granulométricas, se exponen a continuación algunos detalles sobre tales métodos.

Siempre que se cuente con suficiente número de puntos, la representación gráfica de la distribución granulométrica debe estimarse preferible a la numérica en tablas.

La gráfica de la distribución granulométrica suele dibujarse con porcentajes como ordenadas y tamaños de las partículas como abscisas. Las ordenadas se refieren a porcentaje, en peso, de las partículas menores que el tamaño correspondiente. La representación en escala semilogarítmica (eje de abscisas en escala logarítmica) resulta preferible a la simple representación natural, pues en la primera se dispone de mayor amplitud en los tamaños finos y muy finos, que en escala natural resultan muy comprimidos, usando un módulo práctico de escala. La forma de la curva da idea inmediata de la distribución granulométrica del suelo; un suelo constituido por partículas de un solo tamaño estará representado por una línea vertical (pues el 100 % de sus partículas, en peso, es de menor tamaño que cualquiera mayor que el suelo posea); una curva muy tendida indica gran variedad en tamaños (suelo bien graduado).

En la Fig. 1 se muestran algunas curvas granulométricas reales.

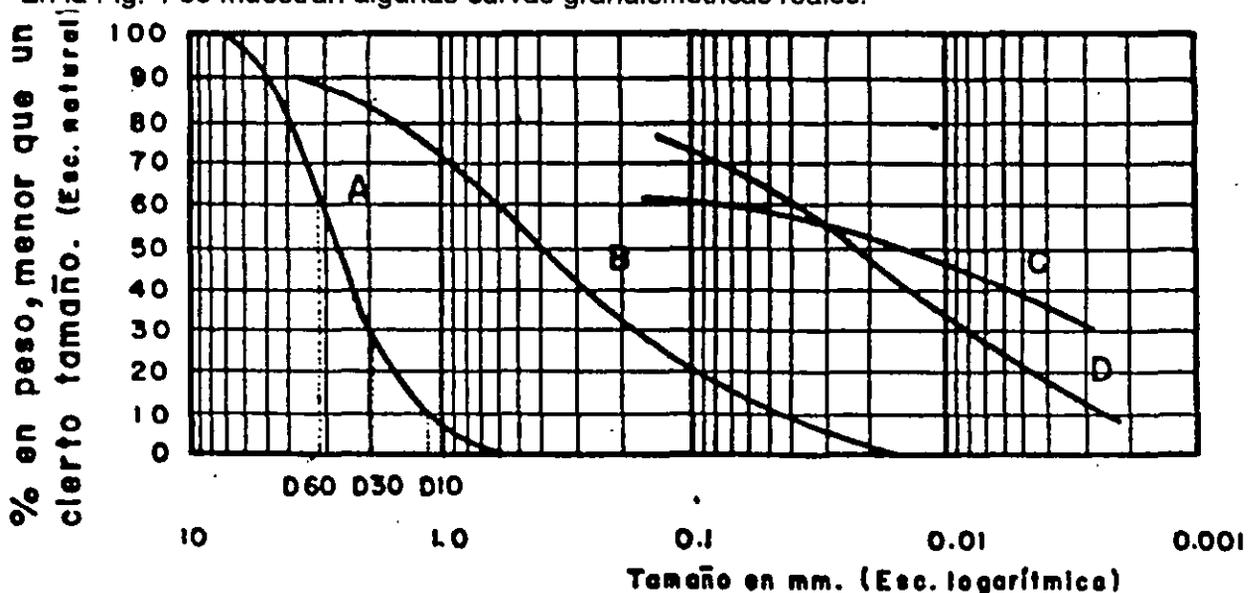


Figura 1. Curvas granulométricas de algunos suelos. A) Arena muy uniforme de Ciudad Cuauhtémoc, México. B) Suelo bien graduado, Puebla, México. C) Arcilla del Valle de México (curva obtenida con hidrómetro). D) Arcilla del Valle de México (curva obtenida con hidrómetro).

Como una medida simple de la uniformidad de un suelo, Allen Hazen propuso el coeficiente de uniformidad

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad 1$$

en donde:

D_{60} : tamaño tal, que el 60 %, en peso, del suelo, sea igual o menor.

D_{10} : llamado por Hazen diámetro efectivo; es el tamaño tal que sea igual o mayor que el 10 %, en peso, del suelo.

En realidad, la relación (1) es un coeficiente de no uniformidad, pues su valor numérico decrece cuando la uniformidad aumenta. Los suelos con $C_u < 3$ se consideran muy uniformes; aun las arenas naturales muy uniformes rara vez presentan $C_u > 2$.

Como dato complementario, necesario para definir la uniformidad, se define el coeficiente de curvatura del suelo con la expresión

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad 2$$

D_{30} se define análogamente que los D_{10} y D_{60} anteriores. Esta relación tiene un valor entre 1 y 3, en suelos bien graduados, con amplio margen de tamaños de partículas y cantidades apreciables de cada tamaño intermedio.

A partir de las curvas granulométricas aumentativas descritas, es posible encontrar la curva correspondiente a la función

$$y = \frac{d(p)}{d(\log D)}$$

p es el porcentaje, en peso, de las partículas menores que un cierto tamaño, y D el tamaño correspondiente; la curva anterior, que se dibuja en escala semilogarítmica, suele denominarse el histograma del suelo y representa partículas entre ciertos tamaños. El área bajo el histograma es 100, por representar la totalidad de las partículas del suelo. En la Fig. 2 aparece un histograma de un suelo en el que predominan partículas de tamaño próximo a 1 mm.

Los valores más altos del histograma corresponden a zonas muy verticales de la curva acumulativa primeramente vista, y los valores más bajos a zonas con tendencia a la horizontalidad. Actualmente el uso de histogramas no está muy extendido en los laboratorios.

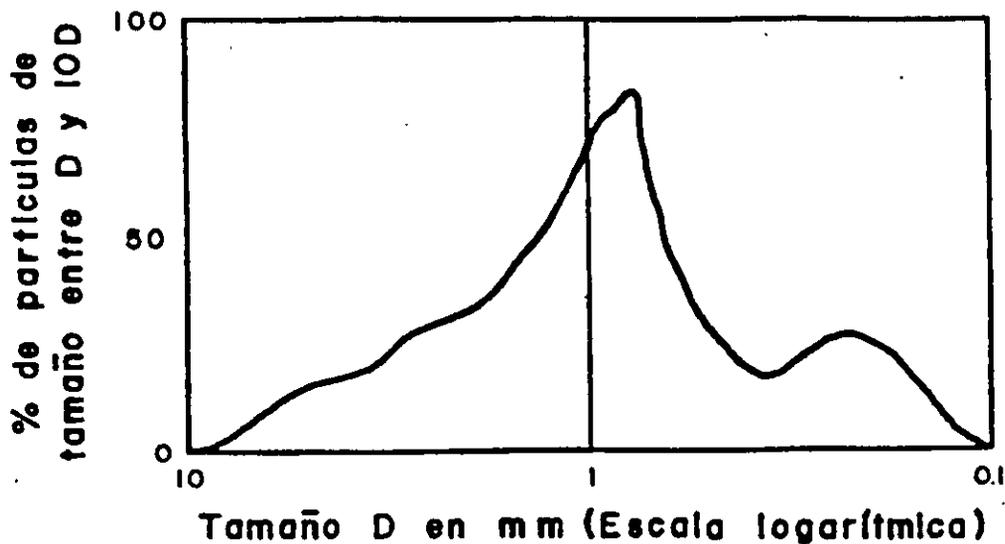


Figura 2 Histograma de un suelo.

También se han representado las curvas granulométricas en escala doblemente logarítmica, con la ventaja, para algunos usos, de que en este caso, en muchos suelos naturales la forma de las curvas se acerca notablemente a una línea recta.

Bajo el título de Análisis Mecánico quedan comprendidos todos los métodos para la separación de un suelo en diferentes fracciones, según sus tamaños. De tales métodos existen dos que merecen atención especial: el cribado por mallas y el análisis de una suspensión del suelo con hidrómetro (densímetro).

El primero se usa para obtener las fracciones correspondientes a los tamaños mayores del suelo; generalmente se llega así hasta el tamaño correspondiente a la malla N° 200 (0.074 mm). La muestra de suelo se hace pasar sucesivamente a través de un juego de tamices de aberturas descendentes, hasta la malla N° 200; los retenidos en cada malla se pesan y el porcentaje que representan respecto al peso de la muestra total se suma a los porcentajes retenidos en todas las mallas de mayor tamaño; el complemento a 100 % de esa cantidad da el porcentaje de suelo que es menor que el tamaño representado por la malla en cuestión. Así puede tenerse un punto de la curva acumulativa correspondiente a cada abertura. El método se dificulta cuando estas aberturas son pequeñas y, por ejemplo, el cribado a través de las mallas N° 100 (0.149 mm) y N° 200 (0.07 mm) suele requerir agua para facilitar el paso de la muestra (procedimiento de lavado).

Los tamaños menores del suelo exigen una investigación fundada en otros principios. El método del hidrómetro (densímetro) es hoy, quizá, el de uso más extendido y el único que se verá con cierto grado de detalle. Como todos los de este grupo, el método se basa en el hecho de que la velocidad de sedimentación de partículas en un líquido es función de su tamaño. El método fue propuesto independientemente por Goldschmidt en Noruega (1926) y por Bouyoucos en los Estados Unidos de América (1927).

Debido a lo importante de los errores que afectaban a las pruebas originales, el método no satisfizo a muchos especialistas, por lo que, en épocas posteriores, el Public Road Administration de los Estados Unidos encomendó al doctor A. Casagrande la investigación de

tales errores, para su eliminación y necesaria corrección. Como resultado de sus estudios, Casagrande propuso el hidrómetro aerodinámico, calibrado en pesos específicos relativos (en lugar de su primitiva calibración en gramos de un suelo estandarizado, por litro), y algunos cambios radicales en el procedimiento de la prueba, con el objeto de eliminar los errores principales; obtuvo también fórmulas para las correcciones necesarias en ciertos pasos, cuyos errores no pudieron eliminarse al cambiar el procedimiento.

La ley fundamental de que se hace uso en el procedimiento del hidrómetro es debida a Stokes, y proporciona una relación entre la velocidad de sedimentación de las partículas del suelo en un fluido y el tamaño de esas partículas. Esta relación puede establecerse empíricamente, haciendo observaciones con microscopio, o bien con procedimientos teóricos. Siguiendo estos últimos, G. G. Stokes en 1850 obtuvo una relación aplicable a una esfera que caiga en un fluido homogéneo de extensión infinita. Aun con esa limitación importante (pues las partículas reales de suelo se apartan muchísimo de la forma esférica) la ley de Stokes es preferible a las observaciones empíricas. Aplicando esa ley se obtiene el diámetro equivalente de la partícula, que es el diámetro de una esfera, del mismo Ss que el suelo, que sedimenta con la misma velocidad que la partícula real; en partículas equidimensionales, este diámetro es aproximadamente igual al medio diámetro real, pero en partículas laminares el diámetro real puede ser hasta el cuádruple de equivalente; cabe notar que en partículas muy finas esta forma es al más frecuente. Esta es una razón más para que dos curvas granulométricas iguales, correspondientes a dos suelos diferentes, no indiquen necesariamente la similitud de ambos. Uno podría ser arcilla muy franca con estructura floculenta y el otro una harina de roca, de comportamiento similar al de una arena.

La ley de Stokes tiene la forma

$$v = \frac{2}{9} \frac{\gamma_s - \gamma_f}{\eta} \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad 3$$

en la que

v = velocidad de sedimentación de la esfera, en cm / seg.;

γ_s = peso específico de la esfera, en g / cm³;

γ_f = peso específico del fluido, en g / cm³ (varía con la temperatura)

η = viscosidad del fluido, en g · seg. / cm² (varía con la temperatura)

D = diámetro de la esfera, en cm.

De la fórmula anterior, si D se expresa en mm resulta

$$D = \sqrt{\frac{1,800\eta v}{\gamma_s - \gamma_f}}$$

Aplicada a partículas de suelo real, que se sedimentan en agua, la ley de Stokes es válida solamente en tamaños menores de 0.2 mm, aproximadamente (en mayores tamaños, las turbulencias provocadas por el movimiento de la partícula alteran apreciablemente la ley de sedimentación), pero mayores que 0.2 micras, más o menos (abajo de este límite la partícula se afecta por el movimiento Browniano y no se sedimenta). Nótese que por el análisis de tamices puede llegarse a tamaños de 0.074 mm, que caen dentro del campo de aplicabilidad de la ley de Stokes; este hecho afortunado permite obtener datos ininterrumpidamente.

El método del hidrómetro está, en su origen, afectado por las siguientes hipótesis.

- a) La Ley de Stokes es aplicable a una suspensión del suelo.
- b) Al comienzo de la prueba la suspensión es uniforme y de concentración suficientemente baja para que las partículas no se interfieran al sedimentarse. (En general es apropiada una concentración de unos 50 g / litro.)
- c) El área de la sección recta del bulbo del hidrómetro es despreciable en comparación a la de la probeta donde la sedimentación tiene lugar, de manera que dicho bulbo no interfiere en la sedimentación de las partículas en el instante de efectuarse una medición.

EQUIPO

- 1.- Aproximadamente 500 g de suelo.
- 2.- Balanza mecánica con capacidad de 5.0 kg. y aproximación de 1 g.
- 3.- Un juego de mallas con abertura cuadrada.
- 4.- Un cucharón.
- 5.- Una charola de lámina.
- 6.- Agitador mecánico.
- 7.- Formato N° 2.

PROCEDIMIENTO

1. Secar la muestra que se va a analizar.
2. Colocar las mallas en orden decreciente según su abertura y anotar su peso en la columna respectiva del Formato N° 2.
3. Pesar la muestra de suelo que se va a usar (W_s) y anotarlo en el Formato N° 2 en "peso de la muestra", en gramos.
4. Vaciar el suelo al juego de mallas con el cucharón, procurando que no haya pérdidas de material.
5. Agitar las mallas manual y mecánicamente de 2 a 5 minutos.
6. Pesar las mallas con el suelo retenido y anotarlo en la columna respectiva del Formato N° 2. Por diferencia de peso malla (+) suelo retenido (-) peso de malla obtenemos el Peso del Suelo Retenido.

La suma de todos los pesos retenidos debe ser igual al peso total de la muestra (W_s). Si la suma es diferente en más del 5 % debe realizarse nuevamente la prueba.

7. Calcular el porcentaje retenido en cada malla, dividiendo los pesos de suelo retenido entre el peso total de la muestra (W_s) y multiplicado por 100.
8. Calcular el porcentaje que pasa en peso de cada malla, restando del 100 % total, el porcentaje retenido acumulado en cada malla; anotarlo en su respectiva columna.
9. Graficar la Curva Granulométrica, anotando en el eje de las abscisas en escala logarítmica la abertura de la malla (D mm) y en el eje de las ordenadas el porcentaje que pasa menor que D en escala aritmética.
10. Observando la curva granulométrica definir de qué tipo de material se trata y por medio de los coeficientes de uniformidad (C_u) y de curvatura (C_c) concluir si el suelo es bien o mal graduado.

Errores que se pueden cometer en una clasificación granulométrica:

1. Tiempo insuficiente en el agitado de las mallas.
2. Pérdida de material en la realización de la prueba.
3. Estado defectuoso de las mallas.
4. Existencia de residuos de material en la tela de las mallas que impidan el paso del material.
5. Realizar mal las pesadas de las mallas con o sin material.

b) Límites de Plasticidad.

Introducción

La plasticidad es una de las características del suelo fino que cambia con el contenido de agua; es la propiedad de un material de deformarse sin cambiar de volumen ni agrietarse ni desmoronarse. La plasticidad se usa como una medida de la trabajabilidad en el suelo.



U. N. A. M.
 Facultad de Ingeniería
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS
 CLASIFICACION DE SUELOS
 GRANULOMETRIA POR MALLAS

FORMATO Nº 2

| | |
|---|--|
| OBRA _____ LOCALIZACION _____ ENSAYE No. _____ SONDEO No. _____ MUESTRA No. _____ PROF. _____ DESCRIPCION _____ FECHA _____ OPERADOR _____ CALCULO _____ | PESO DE LA MUESTRA (g) _____ RECIPIENTE No. PARA OBTENER $\omega\%$ _____ PESO RECIP. + SUELO HUMEDO (g) _____ PESO RECIP. + SUELO SECO (g) _____ PESO AGUA (g) _____ PESO RECIPIENTE (g) _____ PESO DE SUELO SECO (g) _____ $\omega\% =$ _____ |
|---|--|

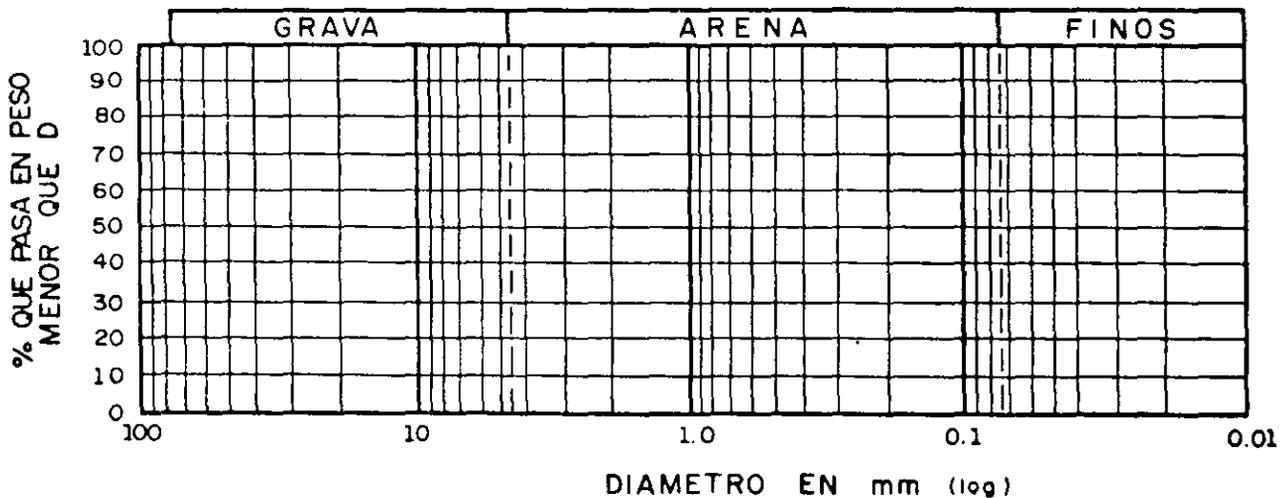
| MALLA | ABERTURA | PESO MALLA | PESO MALLA + SUELO RE | PESO SUELO RET. | RETENIDO PARCIAL | % QUE PASA MENOR Q' D |
|--------|----------|------------|-----------------------|-----------------|------------------|-----------------------|
| Nº | mm. | g | g | g | % | % |
| 3" | 76.20 | | | | | |
| 2" | 50.80 | | | | | |
| 1 1/2" | 36.10 | | | | | |
| 1" | 25.40 | | | | | |
| 3/4" | 19.05 | | | | | |
| 1/2" | 12.70 | | | | | |
| 3/8" | 9.52 | | | | | |
| 4 | 4.76 | | | | | |
| 8 | 2.38 | | | | | |
| 18 | 1.00 | | | | | |
| 30 | 0.59 | | | | | |
| 50 | 0.297 | | | | | |
| 100 | 0.149 | | | | | |
| 200 | 0.074 | | | | | |
| SUMA | | | | | | |

>3" = _____ %
 G = _____ %
 S = _____ %
 F = _____ %

$D_{10} =$ _____ mm
 $D_{30} =$ _____ mm
 $D_{60} =$ _____ mm

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{\quad}{\quad} = \quad$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}} = \frac{\quad}{\quad} = \quad$$



CLASIFICACION DE LA PORCION GRUESA: _____

OBSERVACIONES: _____

LIMITES DE CONSISTENCIA

I. INTRODUCCION

Cuando un material se sujeta a esfuerzos de tensión o de compresión uniaxial su comportamiento mecánico está descrito por su relación esfuerzos - deformaciones, una hipótesis referente a su compresibilidad y un criterio de fluencia. La forma de una curva esfuerzo - deformación depende, por supuesto, de las características del material con que se trabaje, pero la investigación ha permitido establecer algunos hechos comunes a muchos materiales. Por ejemplo, para esfuerzos lo suficientemente pequeños en cada caso, la relación esfuerzo - deformación es reversible (comportamiento elástico); para valores mayores del esfuerzo, sin embargo, la relación se hace irreversible, teniéndose un comportamiento llamado " plástico ".

En mecánica de suelos el concepto de plasticidad tiene un sentido mucho más amplio que el expuesto arriba. Aquí, la plasticidad se define como la *propiedad de un material por la cual, al someterlo a la acción de sollicitaciones o cargas, es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse.*

Atterberg hizo ver que la plasticidad de un material como arcilla, por ejemplo, no es una propiedad permanente, sino circunstancial y que depende de su contenido de agua (además de la temperatura). Según su contenido de agua, un suelo susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia:

- 1.- Estado líquido, con las propiedades y apariencia de una suspensión.
- 2.- Estado semilíquido, con las propiedades de un fluido viscoso.
- 3.- Estado plástico, en que el suelo se comporta plásticamente.
- 4.- Estado semisólido, en que el suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aún disminuye de volumen al estar sujeto a secado.
5. Estado sólido, en que el volumen del suelo no varía con el secado.

Los anteriores estados son fases generales por las que pasa el suelo al irse secando y no existen criterios estrictos para distinguir sus fronteras. Atterberg estableció las primeras convenciones para determinar esas fronteras a las que llamó " límites de consistencia ".

II. ANTECEDENTES

Las fronteras que definió Atterberg son las siguientes:

- 1.- *límite líquido*.- frontera entre los estados semilíquido y plástico.
- 2.- *límite plástico*.- frontera entre los estados plástico y sólido.
- 3.- *límite de contracción*.- frontera entre los estados de consistencia semisólido y sólido.

A las dos primeras fronteras, que definen el intervalo plástico de un suelo se les denomina *límites de plasticidad*. Para definir la plasticidad de un material, además de estos parámetros, Atterberg introdujo la utilización de un tercer término denominado *índice plástico*, igual a la diferencia entre los valores de los límites de plasticidad.

La técnica de laboratorio que Atterberg utilizó para definir el límite líquido consistía en colocar al suelo remoldeado en una cápsula, formando en él una ranura, y en hacer cerrar la ranura golpeando secamente la cápsula contra una superficie dura; el suelo tenía el contenido de agua correspondiente al límite líquido, según Atterberg, cuando los bordes inferiores de la ranura se tocaban, sin mezclarse, al cabo de un cierto número de golpes.

Para determinar el límite plástico, Atterberg rolaba un fragmento de suelo hasta convertirlo en un cilindro de espesor no especificado; el agrietamiento y desmoronamiento del rollito, en un cierto momento, indicaba que se había alcanzado el límite plástico.

Para determinar el límite de contracción, Atterberg efectuaba mediciones de la contracción del suelo, hasta que ya no se apreciara cambio de volumen.

Debido a que los métodos empleados por Atterberg presentaban muchos detalles sin especificar ya que la experiencia demuestra que esos detalles son de trascendencia en los resultados de las pruebas, se desarrollaron otros métodos tratando de estandarizar los propuestos anteriormente. Para la determinación del límite líquido se desarrolló la *Copa de Casagrande* que es un recipiente de bronce o latón con un tacón solitario del mismo material; el tacón y la copa giran en torno a un eje unido a la base. Una excéntrica hace que la copa caiga periódicamente, golpeándose contra la base del dispositivo, que es de hule duro o micarca 221. La altura de caída de la copa es por especificación de 1 cm, medido verticalmente desde el punto de la copa que toca la base al caer, hasta la base misma, estando la copa en su punto más alto. La copa es esférica, con radio interior de 54 mm, espesor 2 mm y peso 200 ± 20 g incluyendo el tacón.

Sobre la copa se coloca el suelo y se procede a hacerle una ranura trapecial con las dimensiones mostradas en la figura 3. Para hacer la ranura debe usarse un ranurador como el que se muestra en la figura 4.

El límite obtenido por medio de la copa de Casagrande se define como el contenido de agua del suelo para el que la ranura se cierra a lo largo de 1.27 cm ($\frac{1}{2}$ "), con 25 golpes en la copa. Sin embargo, el límite líquido se determina conociendo 5 o más contenidos de humedad con

los correspondientes números de golpes y trazando la curva contenido de agua - Número de golpes (log). La ordenada de esta curva correspondiente a la abscisa de 25 golpes es el contenido de agua correspondiente al límite líquido. Experimentalmente se encontró que el trazo semilogarítmico de esta curva es una recta cerca del límite líquido.

Para la determinación del límite plástico Terzaghi introdujo la condición de que el diámetro final de los cilindros o rollitos de suelo fuese de 3 mm (1/8 "). La formación de los rollitos se hace sobre una placa de vidrio, partiendo de un contenido de agua correspondiente al natural de la muestra. Cuando los rollitos llegan a los 3 mm, se doblan y presionan, formando una pastilla que vuelve a rolarse, hasta que en los 3 mm justos ocurra el desmoronamiento y agrietamiento; en tal momento el suelo tendrá un contenido de agua correspondiente al límite plástico.

Para la determinación del límite de contracción, Terzaghi sugirió un método más simple, que esencialmente consiste en medir el peso y el volumen de una muestra de suelo totalmente seca; en tal momento, puede decirse que el límite de contracción sería la humedad de la muestra seca si tuviese sus vacíos llenos de agua.

III. EQUIPO

- 1.- Una copa de Casagrande con aditamentos (ranurador, calibrador, etc.)
- 2.- Malla número 40
- 3.- Espátulas
- 4.- Placas de vidrio
- 5.- Rociador
- 6.- Vernier
- 7.- Anillo plástico para la determinación del límite de contracción
- 8.- Dispositivo de Terzaghi para medir volumen de muestra seca
- 9.- Matraz aforado
- 10.- Parrilla eléctrica
- 11.- Bomba de vacío
- 12.- Termómetro
- 13.- Balanzas de diferentes capacidades y discriminaciones
- 14.- Homo de secado
- 15.- Desecador

IV. PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

Los ensayos deberán realizarse en el cuarto húmedo.

IV.1. Calibración de la copa Casagrande

- 1.- Verificar que el espesor del escantillón para el ajuste de la altura de caída de la copa sea de 1 cm.
- 2.- Retirar la copa del resto del dispositivo y marcar con lápiz una cruz en el centro del punto en el que la copa golpea la base.
- 3.- Colocar nuevamente la copa en el dispositivo. Dar vuelta a la manija hasta que la copa se eleve a su máxima posición.
- 4.- Verificar la altura, utilizando el escantillón, del punto marcado con lápiz a la base.
- 5.- Si la altura de caída no es exactamente un centímetro, aflojar los tornillos de fijación y mover el tornillo de ajuste lo necesario; apriétense los tornillos de fijación.
- 6.- Repetir la verificación de la altura de caída de la copa.
- 7.- Verificar los siguientes detalles en el dispositivo:
 - a) Los puntos de impacto tanto en la base como en la copa no deberán estar gastados. Si la marca en la base tiene una profundidad igual o mayor que 0.1 mm, la superficie deberá volverse a pulir.
 - b) La mayoría de los dispositivos comerciales están provistos de cuatro patas de hule bastante duro. Para lograr consistencia en los resultados, la base deberá tener sólo tres patas de hule muy suave, localizadas en las dos esquinas posteriores y en el centro del lado frontal de la base.
 - c) Para verificar la restauración dinámica de la base, dejar caer un balón de acero de 8 mm (5/16 ") de diámetro, de una altura de 25.4 cm. (10 ") y observar la altura de rebote que deberá estar comprendida entre 18.5 cm (7.3 ") y 23 cm (9 "). El peso del balón es de casi 2 g.
 - d) Durante los últimos 10 a 20 grados de rotación de la manija, justo antes de que la copa caiga sobre la base, la altura de la copa sobre la base no deberá variar prácticamente.
 - e) El peso de la copa deberá ser de 200 g \pm 20 g.
 - f) Verificar las siguientes dimensiones de la herramienta de ranuración:

Ancho en el fondo: 2.00 \pm 0.05 mm.

Profundidad de la ranura: 8.0 \pm 0.1 mm.

Ancho en la parte superior de la ranura : 11.0 \pm 0.2 mm.

IV.2. Límite líquido

- 1.- Se remoldea material que pase la malla número 40, para obtener una pasta uniforme.
- 2.- Se preparan cinco fracciones de aproximadamente 100 g cada una, con diferentes contenidos de agua al rededor del límite líquido, partiendo de su contenido natural de agua. Si el contenido de agua es tal que se tenga que agregar agua se deberá homogenizar un tiempo aproximado de 24 horas.

Una vez hecho lo anterior la prueba se aboca a lo siguiente para cada fracción de suelo preparado:

- 3.- Colocar en la copa entre 50 y 75 g de la muestra preparada. Mezclar cuidadosamente el suelo para asegurar uniformidad en el contenido de agua y evitar burbujas. Enrasar la superficie del suelo en la copa con la espátula.
- 4.- Labrar una ranura con la herramienta cuidando los siguientes detalles: Al cortar la ranura, la copa debe mantenerse con su soporte en la parte superior. La herramienta de ranuración se mantiene perpendicular a la superficie del fondo de la copa y se baja cortando el suelo a lo largo del meridiano central, perpendicularmente al eje de rotación de la copa, la parte redondeada del escantillón deberá estar dirigida hacia el operador. Si se ha colocado en la copa la cantidad correcta de suelo, los hombros de la herramienta de ranuración deben remover el suelo en una longitud de aproximadamente 38 mm en la vecindad de la parte superior de la ranura.
- 5.- Limpiar las partes golpeantes del aparato.
- 6.- Dar vuelta a la manija (con una frecuencia de dos revoluciones por segundo) hasta que la ranura se cierre en una longitud de aproximadamente 1.3 cm. ($\frac{1}{2}$ "). Anotar el número de golpes para el cerrado de la ranura. Si el cierre de la ranura es irregular debido a burbujas de aire o granos de arena, descartar el resultado obtenido y repetir la prueba.
- 7.- Mezclando cuidadosamente el mismo material del punto 6, hacer dos determinaciones, más registrando el número de golpes para cada determinación.
- 8.- Después de la última determinación, quitar con la espátula aproximadamente 5 g de material de la zona de cierre de la ranura para determinar su contenido de agua.
- 9.- Repetir los pasos 3 a 8 para las otras porciones del material preparado, para obtener cuando menos dos puntos en la curva de fluidez entre 5 y 25 golpes y cuando menos dos entre 25 y 50 golpes.

IV.2. Límite Líquido

- 1.- Se remoldea material que pase la malla número 40, para obtener una pasta uniforme.
- 2.- Se preparan cinco fracciones de aproximadamente 100 g cada una, con diferentes contenidos de agua al rededor del límite líquido, partiendo de su contenido natural de agua. Si el contenido de agua es tal que se tenga que agregar agua se deberá homogenizar un tiempo aproximado de 24 horas.

Una vez hecho lo anterior la prueba se aboca a lo siguiente para cada fracción de suelo preparado:

- 3.- Colocar en la copa entre 50 y 75 g de la muestra preparada. Mezclar cuidadosamente el suelo para asegurar uniformidad en el contenido de agua y evitar burbujas. Enrasar la superficie del suelo en la copa con la espátula.
- 4.- Labrar una ranura con la herramienta cuidando los siguientes detalles: Al cortar la ranura, la copa debe mantenerse con su soporte en la parte superior. La herramienta de ranuración se mantiene perpendicular a la superficie del fondo de la copa y se baja cortando el suelo a lo largo del meridiano central, perpendicularmente al eje de rotación de la copa, la parte redondeada del escantillón deberá estar dirigida hacia el operador. Si se ha colocado en la copa la cantidad correcta de suelo, los hombros de la herramienta de ranuración deben remover el suelo en una longitud de aproximadamente 38 mm en la vecindad de la parte superior de la ranura.
- 5.- Limpiar las partes golpeantes del aparato.
- 6.- Dar vuelta a la manija (con una frecuencia de dos revoluciones por segundo) hasta que la ranura se cierre en una longitud de aproximadamente 1.3 cm. ($\frac{1}{2}$ "). Anotar el número de golpes para el cerrado de la ranura. Si el cierre de la ranura es irregular debido a burbujas de aire o granos de arena, descartar el resultado obtenido y repetir la prueba.
- 7.- Mezclando cuidadosamente el mismo material del punto 6, hacer dos determinaciones, más registrando el número de golpes para cada determinación.
- 8.- Después de la última determinación, quitar con la espátula aproximadamente 5 g de material de la zona de cierre de la ranura para determinar su contenido de agua.
- 9.- Repetir los pasos 3 a 8 para las otras porciones del material preparado, para obtener cuando menos dos puntos en la curva de fluidez entre 5 y 25 golpes y cuando menos dos entre 25 y 50 golpes.

IV.3. Límite plástico

- 1.- Tomar aproximadamente un centímetro cúbico de la muestra preparada para la prueba de límite líquido.
- 2.- Reducir el contenido de agua de la muestra, rodándola repentinamente sobre una placa de vidrio hasta formar rollitos de suelo de 3 mm. Plegar entre los dedos el cilindro de suelo, comprimiéndolo para que tome una forma elipsoidal. Rodar nuevamente el cilindro repitiendo varias veces el proceso hasta que el cilindro de suelo se rompa en segmentos con longitud entre 6 y 10 mm, con un diámetro de 3.2 mm (1/8 ").
- 3.- Determinar inmediatamente el contenido de agua de suelo de los segmentos de cilindro del punto 2.
- 4.- Hacer dos determinaciones más en otras porciones del suelo, para obtener un promedio del límite plástico.
- 5.- Las determinaciones del límite plástico deberán coincidir con una precisión de ± 2 %. Si no coinciden deberán hacerse determinaciones adicionales.

IV.4. Límite de contracción

- 1.- La muestra preparada deberá tener un contenido de agua próximo al límite líquido. Si se tiene que agregar agua, dejar homogeneizar 24 horas.
- 2.- Cubrir la superficie de una placa de vidrio con una capa delgada de aceite de silicón o vaselina.
- 3.- Cubrir el interior de un anillo de plástico con una ligera capa de aceite y colocar el anillo sobre la placa de vidrio.
- 4.- Colocar la muestra de suelo con el contenido de agua indicando en el punto 1, en el anillo de plástico, con una espátula de cuchillo, enrasando cuidadosamente la superficie. Evitando la presencia de burbujas de aire atrapado.
- 5.- Permitir al espécimen permanecer descubierto en el cuarto húmedo por varios días. Posteriormente, secar al aire en el laboratorio por varios días, hasta observar un cambio de color en el suelo y que se separe del anillo. Posteriormente, después de retirarlo del anillo de plástico, secar al horno 18 a 24 horas.
- 6.- Determinar el volumen de la muestra seca utilizando el procedimiento de Terzaghi (anexo A).
- 7.- Pesar la pastilla de suelo para obtener peso seco.

ANEXO A

Método de Terzaghi para la determinación del volumen de una muestra de suelo.

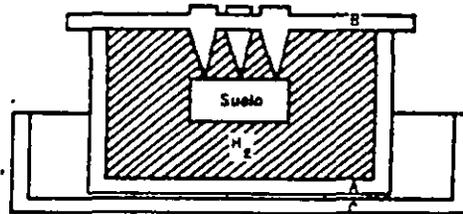


Figura A.1 Método de Terzaghi para la determinación del volumen de muestra de suelo.

Figura A. 1 Método de Terzaghi para la determinación del volumen de una muestra de suelo.

Un recipiente de vidrio o lucita (A) se llena de mercurio hasta derramarse y se enrasa cuidadosamente, cubriéndolo con una placa (B) del mismo material, provista de tres patas. A continuación, se coloca el recipiente (A) en otro mayor (C); la muestra seca se deposita sobre la superficie del mercurio y se sumerge presionándola con las patas de la placa (B), hasta que dicha placa vuelve a quedar bien ajustada sobre (A); las patas impiden que la muestra se ladee, manteniéndola sumergida. La cantidad de mercurio desplazada de (A) se recoge en (C) y se pesa, calculando así su volumen, si se conoce el peso específico del mercurio, que para fines prácticos puede tomarse como 13.56.

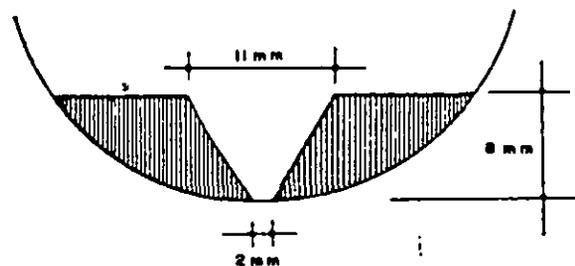


Figura 3 Dimensión de la ranura en la copa de Casagrande.

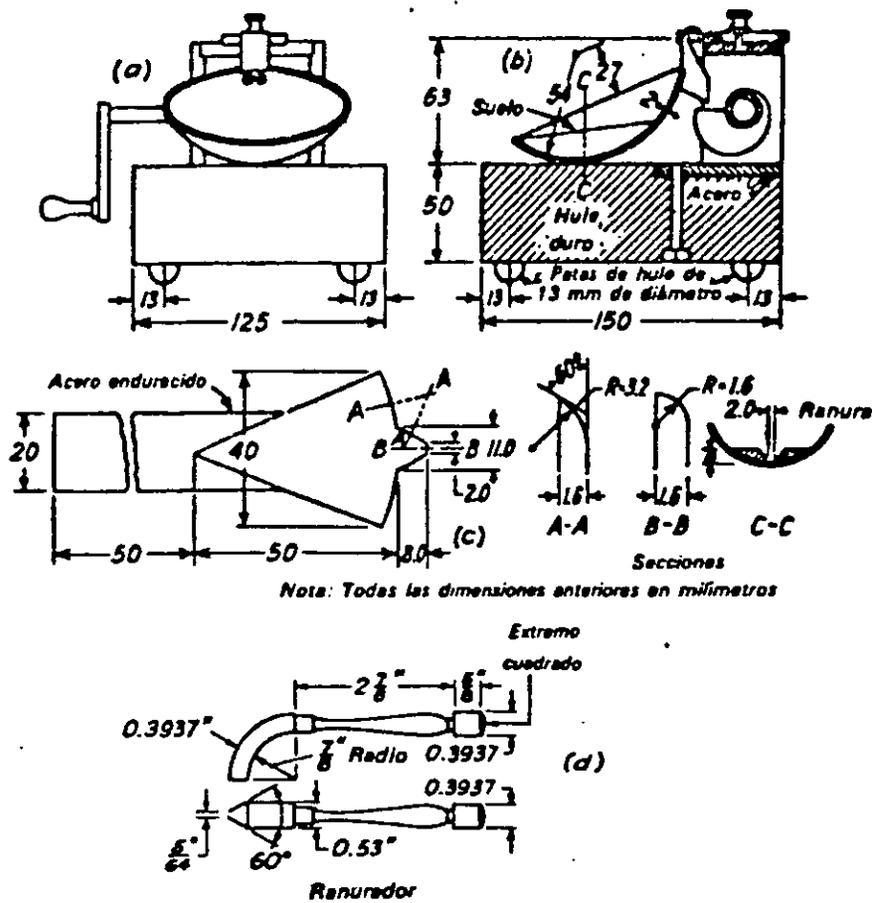


Figura 4 a) y b) Aparato mecánico para determinar el límite líquido. c) Ranurador de Casagrande d) Ranurador estándar de la ASTM.

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

El sistema cubre los suelos gruesos y los finos, distinguiéndose ambos por el cribado a través de la malla 200; las partículas gruesas son mayores que dicha malla y las finas, menores. Un suelo se considera *grueso* si más del 50 % de sus partículas son gruesas, y *fino*, si más de la mitad de sus partículas, en peso, son finas.

Se describirán en primer lugar los diferentes grupos referentes a suelos gruesos.

Suelos gruesos

El símbolo de cada grupo está formado por dos letras mayúsculas, que son las iniciales de los nombres ingleses de los suelos más típicos de ese grupo. El significado se especifica abajo.

a) Gravas y suelos en que predominen éstas. Símbolo genérico G (gravel).

b) Arenas y suelos arenosos. Símbolo genérico S (sand).

Las gravas y las arenas se separan con la malla N° 4, de manera que un suelo pertenece al grupo genérico G, si más del 50 % de su fracción gruesa (retenida en la malla 200) no pasa la malla N° 4, y es del grupo genérico S, en caso contrario.

Las gravas y las arenas se subdividen en cuatro tipos:

1. Material prácticamente limpio de finos, bien graduado. Símbolo W (well graded). En combinación con los símbolos genéricos, se obtienen los grupos GW y SW.

2. Material prácticamente limpio de finos, mal graduado. Símbolo P (poorly graded). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GP y SP.

3. Material con cantidad apreciable de finos no plásticos. Símbolo M (del sueco mo y mjala). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GM y SM.

4. Material con cantidad apreciable de finos plásticos. Símbolo C (clay). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GC y SC.

A continuación se describen los grupos anteriores a fin de proporcionar criterios más detallados de identificación, tanto en el campo como en el laboratorio.

Grupos GW Y SW

Según se dijo, estos suelos son bien graduados y con poco finos o limpios por completo. La presencia de los finos que puedan contener estos grupos no debe producir cambios apreciables en las características de resistencia de la fracción gruesa, ni interferir con su capacidad de drenaje. Los anteriores requisitos se garantizan en la práctica, especificando que

en estos grupos el contenido de partículas finas no sea mayor de un 5 %, en peso. La graduación se juzga en el laboratorio, por medio de los coeficientes de uniformidad y curvatura. Para considerar una grava bien graduada se exige que su coeficiente de uniformidad sea mayor que 4, mientras el de curvatura debe estar comprendido entre 1 y 3. En el caso de las arenas bien graduadas, el coeficiente de uniformidad será mayor que 6, en tanto el de curvatura debe estar entre los mismos límites anteriores.

Grupos GP y SP

Estos suelos son mal graduados; es decir, son de apariencia uniforme o presentan predominio de un tamaño o de un margen de tamaños, faltando algunos intermedios; en laboratorio, deben satisfacer los requisitos señalados para los dos grupos anteriores, en lo referente a su contenido de partículas finas, pero no cumplen los requisitos de graduación indicados para su consideración como bien graduados. Dentro de esos grupos están comprendidas las gravas uniformes, tales como las que se depositan en los lechos de los ríos, las arenas uniformes, de médanos y playas y las mezclas de gravas y arenas finas, provenientes de estratos diferentes obtenidas durante un proceso de excavación.

Grupos GM y SM

En estos grupos el contenido de finos afecta las características de resistencia y esfuerzo - deformación y la capacidad de drenaje libre de la fracción gruesa; en la práctica se ha visto que esto ocurre para porcentajes de finos superiores a 12 %, en peso, por lo que esa cantidad se toma como frontera inferior de dicho contenido de partículas finas. La plasticidad de los finos en estos grupos varía entre " nula " y " media ", es decir, es requisito que los límites de plasticidad localicen a la fracción que pase la malla N° 40 abajo de la Línea A o bien que su índice de plasticidad sea menor que 4.

Grupos GC y SC

Como antes, el contenido de finos de estos grupos de suelos debe ser mayor que 12 %, en peso, y por las mismas razones expuestas para los grupos *GM* y *SM*. Sin embargo, en estos casos, los finos son la media a alta plasticidad; es ahora requisito que los límites de plasticidad sitúen a la fracción que pase la malla N° 40 sobre la Línea A, teniéndose, además, la condición de que el índice plástico sea mayor que 7.

A los suelos gruesos con contenido de finos comprendido entre 5 % y 12 %, en peso, el Sistema Unificado los considera casos de frontera, adjudicándoles un símbolo doble. Por ejemplo, un símbolo *GP - GC* indica una grava mal graduada, con un contenido entre 5 % y 12 % de finos plásticos (arcillosos).

Cuando un material no cae claramente dentro de un grupo, deberán usarse también símbolos dobles, correspondientes a casos de frontera. Por ejemplo, el símbolo *GW - SW* se usará para un material bien graduado, con menos de 5 % de finos y formada su fracción gruesa por iguales proporciones de grava y arena.

Suelos finos

También en este caso el Sistema considera a los suelos agrupados, formándose el símbolo de cada grupo por dos letras mayúsculas, elegidas con un criterio similar al usado para los suelos gruesos, y dando lugar a las siguientes divisiones:

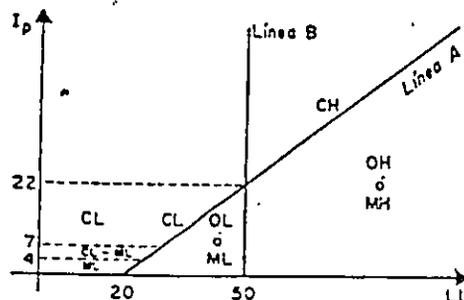
- Limos inorgánicos, de símbolo genérico *M* (del sueco *mo* y *mjala*).
- Arcillas inorgánicas, de símbolo genérico *C* (*clay*).
- Limos y arcillas orgánicas, de símbolo genérico *O* (*organic*).

Cada uno de estos tres tipos de suelos se subdividen, según su límite líquido, en dos grupos. Si éste es menor de 50 %, es decir, si son suelos de compresibilidad baja o media, se añade al símbolo genérico la letra *L* (*low compressibility*), obteniéndose por esta combinación los grupos *ML*, *CL* y *OL*. Los suelos finos con límite líquido mayor de 50 %, o sea de alta compresibilidad, llevan tras el símbolo genérico la letra *H* (*high compressibility*), teniéndose así los grupos *MH*, *CH* y *OH*.

Ha de notarse que las letras *L* y *H* no se refieren a baja o alta plasticidad, pues esta propiedad del suelo, como se ha dicho, ha de expresarse en función de dos parámetros (*LL* e *I_p*), mientras que en el caso actual sólo el valor del límite líquido interviene. Por otra parte, ya se hizo notar que la compresibilidad de un suelo es una función directa del límite líquido, de modo que un suelo es más compresible a mayor límite líquido.

También es preciso tener en cuenta que el término compresibilidad tal como aquí se trata, se refiere a la pendiente del tramo virgen de la curva de compresibilidad y no a la condición actual del suelo inalterado, pues éste puede estar seco ocasión de volver sobre el tema, con mayor detalle.

Los suelos altamente orgánicos, usualmente fibrosos, tales como turbas y suelos pantanosos, extremadamente compresibles, forman un grupo independiente del símbolo *Pt* (del inglés *peat*; turba).



Carta de plasticidad.

Los distintos grupos de suelos finos ya mencionados se describen a continuación en forma más detallada.

Grupos CL Y CH

Según ya se dijo, en estos grupos se encasillan las arcillas inorgánicas. El grupo *CL* comprende a la zona sobre la *Línea A*, definida por $LL < 50\%$ e $I_p > 7\%$.

El grupo *CH* corresponde a la zona arriba de la *Línea A*, definida por $LL > 50\%$. Las arcillas formadas por descomposición química de cenizas volcánicas, tales como la bentonita o la arcilla del Valle de México, con límites líquidos de hasta 500 %, se encasillan en el grupo *CH*.

Grupos ML y MH

El grupo *ML* comprende la zona bajo la *Línea A*, definida por $LL < 50\%$ y la porción sobre la *línea A* con $I_p < 4$. El grupo *MH* corresponde a la zona abajo de la *Línea A*, definida por $LL > 50\%$.

En estos grupos quedan comprendidos los limos típicos inorgánicos y limos arcillosos. Los tipos comunes de limos inorgánicos y polvo de roca, con $LL < 30\%$, se localizan en el grupo *ML*. Los depósitos eóliticos, del tipo de Loess, con $25\% < LL < 35\%$ usualmente, caen también en este grupo.

Un tipo interesante de suelos finos que caen en esta zona son las arcillas del tipo caolín, derivados de los feldespatos de roca graníticas; a pesar de que el nombre de arcillas está muy difundido para estos suelos, algunas de sus características corresponden a limos inorgánicos; por ejemplo, su resistencia en estado seco es relativamente baja y en estado húmedo muestran cierta reacción a la prueba de dilatancia; sin embargo, son suelos finos y suaves con un alto porcentaje de partículas *tamaño de arcilla*, comparable con el de otras arcillas típicas, localizadas arriba de la *línea A*. En algunas ocasiones estas arcillas caen en casos de frontera *ML - CL* y *MH - CH*, dada su proximidad con dicha línea.

Las tierras diatomáceas prácticamente puras suelen no ser plásticas, por más que su límite líquido pueda ser mayor que 100 % (*MH*). Sus mezclas con otros suelos de partículas finas son también de los grupos *ML* o *MH*.

Los suelos finos que caen sobre la *línea A* y son $4\% < I_p < 7\%$ se consideran como casos de frontera, asignándoles el símbolo doble *CL - ML*.

Grupos OL Y OH

Las zonas correspondientes a estos dos grupos son las mismas que las de los grupos *ML* y *MH*, respectivamente, si bien los orgánicos están siempre en lugares próximos a la *línea A*.

Una pequeña adición de materia orgánica coloidal hace que el límite líquido de una arcilla inorgánica crezca, sin apreciable cambio de su índice plástico; esto hace que el suelo se desplace hacia la derecha en la Carta de Plasticidad, pasando a ocupar una posición más alejada de la *línea A*.

Grupo Pt

Las pruebas de límites pueden ejecutarse en la mayoría de los suelos turbosos, después de un completo remoldeo. El límite líquido de estos suelos suele estar entre 300 % y 500 %, quedando su posición en la Carta de Plasticidad netamente abajo de la *línea A*; el índice plástico normalmente varía entre 100 % y 200 %.

Similarmente al caso de suelos gruesos, cuando un material fino no cae claramente en uno de los grupos, se usarán para él símbolos dobles de frontera. Por ejemplo, *MH - CH* representará un suelo fino con *LL* > 50 % e índice plástico tal que el material quede situado prácticamente sobre la *línea A*.

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos no se concreta a ubicar al material dentro de uno de los grupos enumerados, sino que abarca, además, una descripción del mismo, tanto alterado como inalterado. Esta descripción puede jugar un papel importante en la formación de un sano criterio técnico y, en ocasiones, puede resultar de fundamental importancia para poner de manifiesto características que escapan a la mecánica de las pruebas que se realizan. Un ejemplo típico de ello es la compacidad.

En los suelos gruesos, en general, deben proporcionarse los siguientes datos: nombre típico, porcentajes aproximados de grava y arena, tamaño máximo de partículas, angulosidad y dureza de las mismas, características de su superficie, nombre local y geológico y cualquier otra información pertinente, de acuerdo con la aplicación ingenieril que se va a hacer del material.

En suelos gruesos en estado inalterado, se añadirán datos sobre estratificación, compacidad, cementación, condiciones de humedad y características de drenaje.

En los suelos finos, se proporcionarán, en general, los siguientes datos: nombre típico, grado y carácter de su plasticidad, cantidad y tamaño máximo de las partículas gruesas, color de suelo húmedo, olor, nombre local y geológico y cualquier otra información descriptiva pertinente, de acuerdo con la aplicación que se vaya a hacer del material.

Respecto del suelo en estado inalterado, deberá agregarse información relativa a su estructura, estratificación, consistencia en los estados inalterado y remoldeado, condiciones de humedad y características de drenaje.

Identificación de suelos

El problema de la identificación de suelos es de importancia fundamental en la ingeniería; identificar un suelo es, en rigor, encasillarlo dentro de un sistema previo de clasificación. En el caso concreto de este trabajo, es colocarlo en alguno de los grupos mencionados dentro del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos; obviamente en el grupo que le corresponde según sus características. La identificación permite conocer, en forma cualitativa, las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo, atribuyéndole las del grupo en que se sitúe;

naturalmente, según ya se dijo, la experiencia juega un papel importante en la utilidad que se pueda sacar de la clasificación.

Identificación de campo de suelos gruesos

Los materiales constituidos por partículas gruesas se identifican en el campo sobre una base prácticamente visual. Extendiendo una muestra seca del suelo sobre una superficie plana puede juzgarse, en forma aproximada, de su graduación, tamaño de partículas, forma y composición mineralógica. Para distinguir las gravas de las arenas puede usarse el tamaño ½ cm. como equivalente a la malla N° 4, y para la estimación del contenido de finos basta considerar que las partículas de tamaño correspondiente a la malla N° 200 son aproximadamente las más pequeñas que pueden distinguirse a simple vista.

En lo referente a la graduación del material, se requiere bastante experiencia para diferenciar, en examen visual, los suelos bien graduados de los mal graduados. Esta experiencia se obtiene comparando graduaciones estimadas, con las obtenidas en laboratorio, en todos los casos en que se tenga oportunidad. Para examinar la fracción fina contenida en el suelo, deberán ejecutarse las pruebas de identificación de campo de suelos finos que se detallarán adelante, sobre la parte que pase la malla N° 40; si no se dispone de esta malla, el cribado puede sustituirse por una separación manual equivalente.

En ocasiones puede ser importante juzgar de la integridad de las partículas constituyentes de los suelos, en cuyo caso será preciso un examen especialmente cuidadoso. Las partículas procedentes de rocas ígneas sanas se identifican fácilmente; las partículas intemperizadas se reconocen por las decoloraciones y la relativa facilidad con que se desintegran.

Identificación de campo de suelos finos

Una de las grandes ventajas del Sistema Unificado es, como se dijo, el criterio para identificar en el campo los suelos finos, contando con algo de experiencia. El mejor modo de adquirir esa experiencia sigue siendo el aprendizaje al lado de quien ya la posea; en falta de tal apoyo, es aconsejable el comparar sistemáticamente los resultados de la identificación de campo realizada, con los del laboratorio, en cada caso en que exista la oportunidad.

Las principales bases de criterio para identificar suelos finos en el campo son la investigación de las características de dilatancia, de tenacidad y de resistencia en estado seco. El color y el olor del suelo pueden ayudar, especialmente en suelos orgánicos.

El conjunto de pruebas citadas se efectúa en una muestra de suelo previamente cribado por la malla N° 40 o, en ausencia de ella, previamente sometido a un proceso equivalente.

Dilatancia

desmorona fácilmente, cuando el contenido de agua es menor que el correspondiente al límite plástico.

Cuando se trabaje en lugares en que la humedad ambiente sea casi constante, el tiempo que transcurre hasta que se alcance el límite plástico, es una medida relativamente tosca del índice plástico del suelo. Por ejemplo, una arcilla *CH* con $LL = 70\%$ e $I_p = 50\%$ o una *OH* con $LL = 100\%$ e $I_p = 50\%$, precisan mucho más tiempo de manipulación para llegar al límite plástico que una arcilla glacial del tipo *CL*. En limos poco plásticos, del grupo *ML*, el límite plástico se alcanza muy rápidamente. Claro es que para que las observaciones anteriores tengan sentido, será preciso comenzar todas las pruebas con los suelos en la misma consistencia muy aproximadamente, de preferencia cerca del límite líquido.

Resistencia en estado seco

La resistencia de una muestra de úselo, previamente secado, al romperse bajo presiones ejercidas por los dedos, es un índice del carácter de su fracción coloidal.

Los limos *ML* o *MH* exentos de plasticidad no presentan prácticamente ninguna resistencia en estado seco y sus muestras se desmoronan con muy poca presión digital; el polvo de roca y la tierra diatomácea son ejemplos típicos. Una resistencia en estado seco baja es representativa de todos los suelos de baja plasticidad, localizados bajo la *línea A* y aun de algunas arcillas inorgánicas muy limosas, ligeramente sobre la *línea A* (*CL*). Resistencias medias definen generalmente arcillas del grupo *CL* o, en ocasiones, otras de los grupos *CH*, *MH* (arcillas tipo caolín) u *OH*, que se localicen muy cerca de la *línea A*. La mayoría de las arcillas *CH* tienen resistencias altas, así como las *CL* localizadas muy arriba de la *línea A*. Materiales *OH* con altos límites líquidos y próximos a la *línea A* también exhiben grandes resistencias. Por último, resistencias muy altas son típicas de arcillas inorgánicas del grupo *CH*, localizadas en posiciones muy elevadas respecto a la *línea A*.

Color

En exploraciones de campo el color del suelo suele ser un dato útil para diferenciar los diferentes estratos y para identificar tipos de suelo, cuando se posea experiencia local. En general, existen también algunos criterios relativos al color; por ejemplo, el color negro y otros de tonos oscuros suelen ser indicativos de la presencia de material orgánica coloidal. Los colores claros y brillantes son propios, más bien, de suelos inorgánicos.

Olor

Los suelos orgánicos (*OH* y *OL*) tienen por lo general un olor distintivo, que puede usarse para identificación; el olor es particularmente intenso si el suelo está húmedo, y disminuye con la exposición al aire, aumentando, por el contrario, con el calentamiento de la muestra húmeda.

En esta prueba, una pastilla con el contenido de agua necesario para que el suelo adquiera una consistencia suave, pero no pegajosa, se agita alternativamente en la palma de la mano, golpeándola secamente contra la otra mano, manteniéndola apretada entre los dedos. un suelo fino, no plástico, adquiere con el anterior tratamiento, una apariencia *de hígado*, mostrando agua libre en su superficie, mientras se le agita, en tanto que al ser apretado entre los dedos, el agua superficial desaparece y la muestra se endurece, hasta que, finalmente, empieza a desmoronarse como un material frágil, al aumentar la presión. Si el contenido de agua de la pastilla es el adecuado, un nuevo agitado hará que los fragmentos producto del desmoronamiento vuelvan a constituirse.

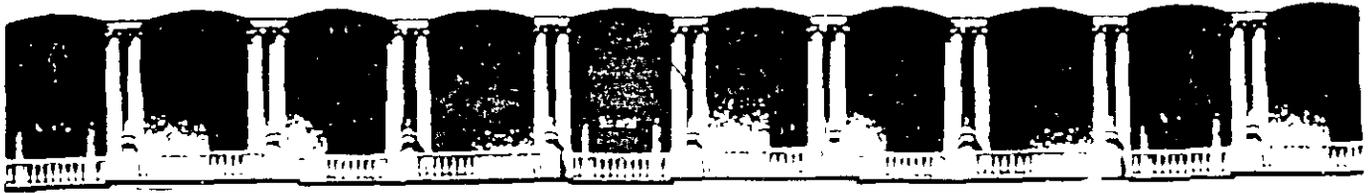
La velocidad con la que la pastilla cambia su consistencia y con la que el agua aparece y desaparece define la intensidad de la reacción e indica el carácter de los finos del suelo. Una reacción rápida es típica en arenas finas uniformes, no plásticas (*SP* y *SM*) y en algunos limos inorgánicos (*ML*), particularmente del tipo *polvo de roca*; también en tierras diatomáceas (*MH*). Al disminuir la uniformidad del suelo, la reacción se hace menos rápida. Contenidos ligeros de arcilla coloidal imparten algo de plasticidad al suelo, por lo que la reacción en estos materiales se vuelve más lenta; esto sucede en los limos inorgánicos y orgánicos ligeramente plásticos (*ML*, *ML - CL*, *MH* y *MH - CH*). Una reacción extremadamente lenta o nula es típica de arcillas situadas sobre la *línea A* (*CL*, *CH*) y de arcillas orgánicas de alta plasticidad (*OH*).

El fenómeno de aparición de agua en la superficie de la muestra es debido a la compactación de los suelos limosos y, aún en mayor grado, de los arenosos, bajo la acción dinámica de los impactos contra la mano; esto reduce la relación de vacíos del material, expulsando al agua de ellos. El amasado posterior aumenta de nuevo la relación de vacíos y el agua se restituye a esos vacíos. Los suelos arcillosos no sufren esos efectos bajo cargas dinámicas, por lo cual no producen reacción.

Tenacidad

La prueba se realiza sobre un espécimen de consistencia suave, similar a la masilla. Este espécimen se rola hasta formar un rollito de unos 3 mm de diámetro aproximado, que se amasa y vuelve a rolar varias veces. Se observa cómo aumenta la rigidez del rollito a medida que el suelo se acerca al límite plástico. Sobre pasado el límite plástico, los fragmentos en que se parta el rollito se juntan de nuevo y amasan ligeramente entre los dedos, hasta el desmoronamiento final.

Cuando más alta sea la posición del suelo respecto a la *línea A* (*CL*, *CH*), es más rígido y tenaz el rollito cerca del límite plástico y abajo del límite plástico. En suelos ligeramente sobre la *línea A*, tales como arcillas glaciales (*CL*, *CH*) los rollitos son de media tenacidad cerca de su límite plástico y la muestra comienza pronto a desmoronarse en el amasado, al bajar su contenido de agua. Los suelos que caen bajo la *línea A* (*ML*, *MH*, *OL* y *OH*) producen rollitos poco tenaces cerca del límite plástico, casi sin excepción; en el caso de suelos orgánicos y micáceos, que caigan muy abajo de la *línea A*, los rollitos se muestran muy débiles y esponjosos. También en todos los suelos bajo la *línea A*, excepto los *OH* próximos a ella, la masa producto de la manipulación entre los dedos posterior al rolado, se muestra suelta y se



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS I

TEMA

IDENTIFICACIÓN DE LOS SUELOS EN CAMPO

**CONFERENCISTA
DR. RIGOBERTO RIVERA CONSTANTINO
PALACIO DE MINERÍA
MAYO 2000**

IDENTIFICACIÓN DE SUELOS EN CAMPO

La utilidad de la identificación de los suelos es básica en la ingeniería, ya que de esa manera se pueden conocer de manera cualitativa las propiedades mecánicas e hidráulicas de los mismos según el grupo de suelo en que se sitúen.

La ubicación de un suelo en un determinado grupo se hace, como es conocido, mediante la combinación de resultados de análisis de laboratorio. Sin embargo, en ocasiones, en campo, un ingeniero con cierto conocimiento de los suelos puede efectuar pruebas sencillas que lo lleven a poder identificar a un suelo de manera aproximada cuando no tenga el equipo de laboratorio para una identificación más precisa. A continuación se mencionan algunas de ellas.

TAMAÑO Y GRANULOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS

Sin pretender dar una explicación muy detallada sobre este aspecto, se puede observar la tabla que para este fin se ha incluido dentro de estas notas, en donde se dan comparaciones quizás muy burdas, pero que para fines prácticos dan una buena idea sobre la clasificación de los suelos de acuerdo a su tamaño. La tabla referida se le llamó " Identificación por el tamaño de los granos".

DILATANCIA O REACCIÓN AL SACUDIDO

Este ensayo es útil para la identificación de suelo con partículas finas. Después de quitar las partículas mayores que la malla no. 40 (0.42 mm.) se prepara una porción de suelo húmedo suficiente para que quepa en la palma de la mano. Deberá quedar una masa suave pero no pegajosa. Una vez que esta pasta esté en la mano, se agita golpeando secamente una mano contra la otra varias veces. Si en la superficie del suelo aparece agua mientras se agita, esta superficie cambia a veces de color, y a veces adquiriendo una apariencia de hígado. Cuando la muestra se aprieta entre los dedos, desaparece de la superficie el agua y el brillo, el suelo se vuelve tieso y finalmente se agrieta y desmorona.

Una reacción de este tipo (rápida), ocurre en arenas finas, uniformes y no plásticas, así como en algunos limos inorgánicos. Cuando se tiene algún contenido de arcilla, ésta le proporciona algo de plasticidad al suelo y la reacción del agua al movimiento es menos rápida. Una reacción muy lenta o francamente inexistente corresponde a arcillas de alta plasticidad.

RESISTENCIA AL FRACTURAMIENTO EN ESTADO SECO

Quitando las partículas de tamaño mayor a la malla no. 40, se moldea una pastilla de suelo hasta alcanzar una consistencia de masilla, añadiendo agua si es necesario. Se deja secar la pastilla al sol o simplemente al aire, y una vez seco se prueba su resistencia al corte, apretándola entre los dedos. La resistencia y la ruptura es una medida de la cantidad de la fracción coloidal que contiene el suelo.

La resistencia al corte en estado seco de un suelo, aumenta al aumentar la plasticidad del mismo. Una alta resistencia es característica de las arcillas del grupo CH y CL.. Los limos no plásticos solo poseen una pequeña resistencia en seco, mientras que las arenas finas limosas se parten inmediatamente.

TENACIDAD

Con las indicaciones iniciales de la prueba de dilatancia, se prepara una masilla de suelo agregando o secando por evaporación hasta adquirir una consistencia de plastilina suave. En este estado se rola en la palma de la mano hasta alcanzar un rollito de 3 mm. de diámetro. Se amasa y se vuelve a rolar varias veces. Durante este proceso el rollito de suelo se llega a poner tieso por la pérdida de agua, perdiendo plasticidad hasta que finalmente se desmorona en el estado plástico.

La mayor o menor tenacidad de la barrita al acercarse al límite plástico es indicativo de la preponderancia de la fracción arcillosa del suelo. La debilidad del rollo en el límite plástico indica la presencia de arcilla inorgánica de baja plasticidad.

IDENTIFICACIÓN POR EL TAMAÑO DE GRANOS

| NOMBRE | LIMITES DE TAMAÑO | EJEMPLO VULGAR |
|---------------|--|------------------------------------|
| Boleo | 305 mm o mayores (12 pulgadas) | Mayor que una pelota de baloncesto |
| Canto rodado | 76 mm a 305 mm (3 a 12 pulgadas) | Naranja - Sandía |
| Grava gruesa | 19 mm a 76 mm (3/4 a 3 pulgadas) | Uva - Naranja |
| Grava fina | 4.76 mm a 19 mm (malla 4 a 3/4 pulgada) | Chicharo - Uva |
| Arena gruesa | 2 mm a 4.76 mm (malla 10 a malla 4) | Sal de cocina |
| Arena mediana | 0.42 mm a 2 mm (malla 40 a malla 10) | Azúcar |
| Arena fina | 0.074 mm a 0.42 mm (malla 200 a malla 40) | Azúcar en polvo |
| Finos | menores de 0.074 mm (malla 200) | * |

* Las partículas menores que la arena fina no se pueden distinguir a simple vista a una distancia de 20 cm.

DIFERENCIAS ENTRE GRAVAS Y ARENAS

GRAVAS > 2 mm

Los granos no se apelmazan aunque estén húmedos, debido a la pequeñez de las tensiones capilares.

Cuando el gradiente hidráulico es mayor que 1, se produce en ellas flujo turbulento.

Es difícil perforar un túnel en gravas con agua mediante aire comprimido, porque la pérdida de aire es muy alta.

ARENAS (entre 0.06 y 2 mm)

Los granos se apelmazan si están húmedos, debido a la importancia de las tensiones capilares.

No se suele producir en ellas flujo turbulento aunque el gradiente hidráulico sea mayor que 1.

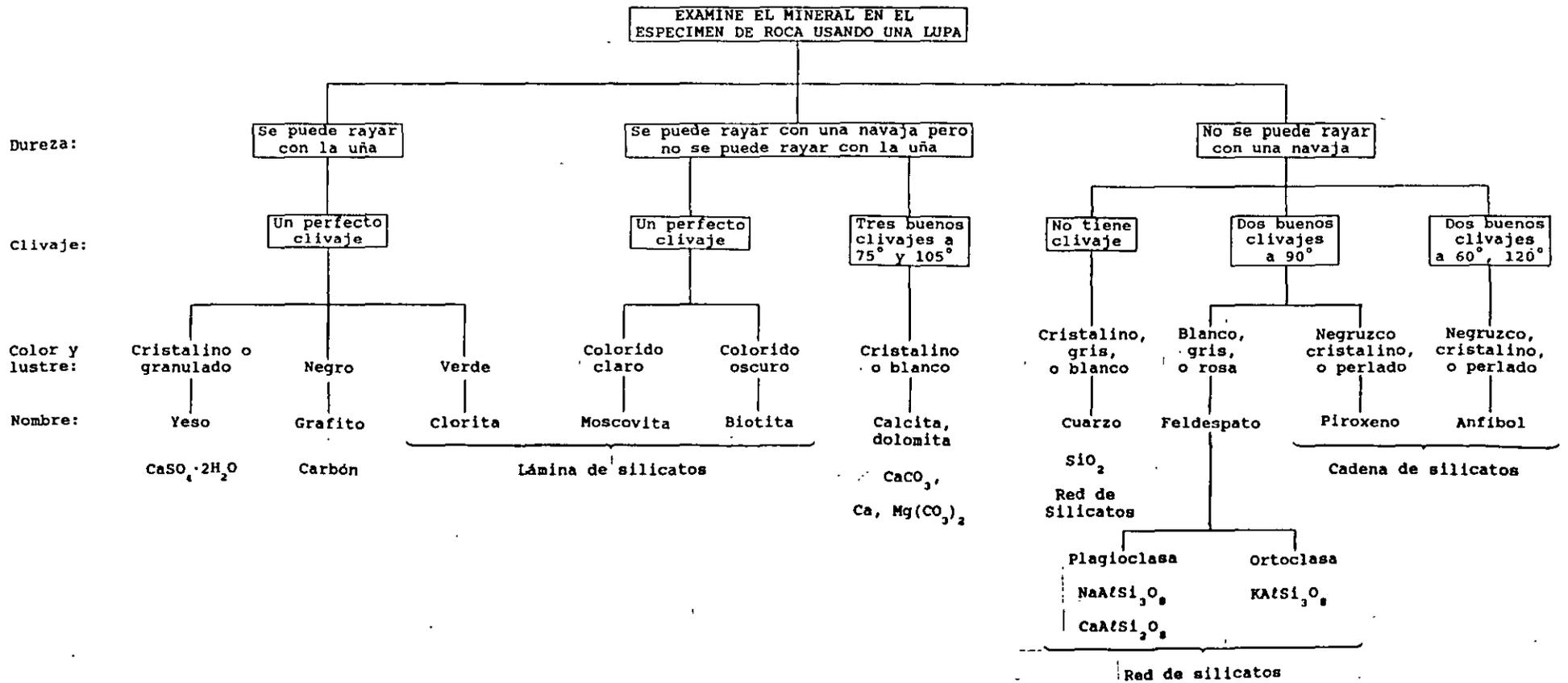
El aire comprimido es adecuado para perforar en ellas.

DIFERENCIAS ENTRE ARENAS Y LIMOS

| ARENAS (entre 0.06 y 2 mm) | LIMOS (entre 0.002 y 0.06 mm.) |
|---|---|
| <p>Partículas visibles.</p> <p>En general, no plásticas.</p> <p>Los terrenos secos tienen una ligera cohesión, pero se reducen a polvo fácilmente entre los dedos.</p> <p>Fácilmente erosionadas por el viento.</p> <p>Fácilmente drenadas mediante bombeo.</p> <p>Los asientos de las construcciones realizadas sobre ellas suelen estar terminados al acabar la construcción.</p> | <p>Partículas invisibles.</p> <p>En general, algo plásticas.</p> <p>Los terrones secos tienen una cohesión apreciable, pero se pueden reducir a polvo con los dedos.</p> <p>Difícilmente erosionados por el viento.</p> <p>Casi imposible de drenar mediante bombeo.</p> <p>Los asientos suelen continuar después de acabada la construcción.</p> |

TABLA A 3.1

DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO DE IDENTIFICACIÓN DE MINERALES:
MINERALES FORMADORES DE ROCAS MÁS COMUNES



DIFERENCIAS ENTRE LIMOS Y ARCILLAS

LIMOS (entre 0.002 y 0.06 mm.)

ARCILLAS (<0.002 mm)

No suelen tener propiedades coloidales.

Suelen tener propiedades coloidales.

A partir de 0.002 mm, y a medida que aumenta el tamaño de las partículas, se va haciendo cada vez mayor la porción de minerales no arcillosos.

Consisten en su mayor parte en minerales arcillosos.

Tacto áspero.

Tacto suave.

Se secan con relativa rapidez y no se pegan a los dedos.

Se secan lentamente y se pegan en los dedos.

Los terrones secos tienen una cohesión apreciable, pero se pueden reducir a polvo con los dedos.

Los terrones secos se pueden partir, pero no reducir a polvo con los dedos.

PRINCIPALES TIPOS DE SUELOS

De acuerdo con el origen de sus elementos (aspecto que ya se ha desglosado en la definición) los suelos se dividen en dos amplios grupos: suelo cuyo origen se debe a la descomposición física y/o química de las rocas o sean los suelos inorgánicos; y los suelos cuyo origen es principalmente orgánico.

Si en los suelos inorgánicos el producto del intemperismo de las rocas permanece en el sitio donde se formó, da origen a un *suelo residual*, en caso contrario forman un *suelo transportado*, cualquiera que haya sido el agente transportador, (por gravedad: talus; por el agua: aluviales o lacustres; por el viento: eólicos; por los glaciares: depósitos glaciares).

En cuanto a los suelos orgánicos, ellos se forman casi siempre *in situ*. Muchas veces la cantidad de materia orgánica, ya sea en forma de humus o de materia no descompuesta, o en estado de descomposición es tan alta, con relación a la cantidad de suelo inorgánico, que las propiedades que pudieran derivar de la porción mineral quedan eliminadas. Esto es muy común en las zonas pantanosas en las cuales los restos de la vegetación acuática llegan a formar verdaderos depósitos de gran espesor, conocidos con el nombre genérico de *turbas*. Se caracterizan por su color negro o café oscuro, por su poco peso cuando están secos y su gran compresibilidad y porosidad. La turba es el primer paso de la conversión de la materia vegetal en carbón.

A continuación se describen los suelos más comunes con los nombres generalmente utilizados por el ingeniero civil para su identificación.

GRAVAS - Las gravas son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y que tienen más de dos milímetros de diámetro. Dado el origen de las gravas, las aristas de sus fragmentos han sufrido desgaste y son por lo tanto redondeadas. Como material suelto, suele encontrarse en los lechos, en las márgenes y en los conos de deyección de los ríos, también en muchas depresiones de terrenos rellenadas por el acarreo de los ríos y en muchos otros lugares a los cuales las gravas han sido retransportadas. Las gravas ocupan grandes extensiones, pero casi siempre se encuentran con una mayor o menor proporción de cantos rodados, arenas, limos y arcillas.

La forma de las partículas de las gravas y su relativa frescura mineralógica, dependen de la historia de la formación de ellas, encontrándose variaciones desde elementos rodados a los poliédricos.

ARENAS .- La arena es el nombre que se le da a los materiales de grano fino procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial y cuyas partículas varían entre 2 mm. Y 0.05 mm. de diámetro.

El origen, y también la existencia de las arenas, es análoga a la de las gravas; las dos suelen encontrarse juntas en el mismo depósito. La arena de río contiene muy a menudo proporciones relativamente grandes de grava y arcilla. Las arenas son materiales que, estando limpias, no se contraen al secarse, no son plásticas, son mucho menos compresibles que la arcilla y si se aplica una carga en su superficie, se comprimen casi instantáneamente.

LIMOS.- Los limos son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, pudiendo ser *limo inorgánico* como el producido en canteras o *limo orgánico* como el que suele encontrarse en los ríos, siendo este último, casi siempre, de características plásticas. El diámetro de las partículas de los limos está comprendido entre 0.05 mm. Y 0.005 mm.

Los limos sueltos y saturados son completamente inadecuados para soportar cargas por medio de zapatas. Su color varía desde gris claro a muy oscuro. La permeabilidad de los limos orgánicos es muy baja y su compresibilidad muy alta.

ARCILLAS.- Se le da el nombre de arcillas a las partículas sólidas con diámetro menor de 0.005 mm. y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. Químicamente es un silicato de alúmina hidratado, aunque en no pocas ocasiones contienen también silicatos de hierro o de magnesio hidratados. La estructura de estos minerales es, generalmente cristalina y complicada, con sus átomos dispuestos en forma láminar.

De hecho se puede decir que hay dos tipos clásicos de tales láminas, uno de ellos del tipo silícico y el otro del tipo aluminico.

Una lámina del tipo silícico se encuentra formada por un átomo de silicio rodeado de cuatro átomos de oxígeno, arreglándose el conjunto en forma de tetraedro. Estos tetraedros se agrupan entre si formando una unidad hexagonal la cual se repite indefinidamente

constituyendo una redícula laminar. La unión entre cada dos tetraedros se lleva a cabo mediante un mismo átomo de oxígeno.

Ahora bien, de acuerdo con su arreglo reticular los minerales de arcilla se pueden clasificar en tres grupos básicos que son:

a) El *caolinítico* (del nombre chino Kau-Ling) que procede de la carbonatación de la ortoclasa. Las arcillas caoliníticas están formadas por una lámina silícica y una lámina aluminica superpuestas indefinidamente y con una unión tal entre sus retículas que no permiten la penetración de moléculas de agua entre ellas, pues producen una capa electrónicamente neutral, lo que induce desde luego a que estas arcillas sean bastante estables en la presencia del agua.

b) El *montmorilonítico* (que debe su nombre a Montmarrillón, Francia), al cual pertenecen las bentonitas, se forman por la superposición indefinida de una lámina aluminica entre dos láminas silícicas, pero con una unión débil entre sus retículas, lo que hace que el agua pueda penetrar en su estructura con facilidad. Estas arcillas en contacto con agua sufren fuerte expansión provocando inestabilidad en ellas.

c) El *ilítico* (que debe su nombre a Illinois, U.S.A.) que son el producto de la hidratación de las micas y que presentan un arreglo reticular similar al de las montmoriloníticas, pero con la tendencia a formar grumos, por la presencia de iones de potasio, lo que reduce el área expuesta al agua y por lo mismo no son tan expansivas como las arcillas montmoriloníticas.

En general las arcillas, ya sean caoliníticas, montmoriloníticas o ilíticas, son plásticas, se contraen al secarse, presentan marcada cohesión según su humedad, son compresibles y al aplicárseles una carga en su superficie se comprimen lentamente. Otra característica interesante, desde el punto de vista de la construcción, es que la resistencia perdida por el remoldeo se recupera parcialmente con el tiempo. Este fenómeno se conoce con el nombre de *tixotropía* y es de naturaleza físico - química.

Además de los clásicos suelos indicados con anterioridad, se encuentran en la naturaleza ciertos suelos especiales que a continuación se indican.

CALICHE: El término *caliche* se aplica a ciertos estratos de suelo cuyos granos se encuentran cementados por carbonatos calcáreos. Parece ser que para la formación de los caliches es necesario un clima semi - árido. La marga es una arcilla con carbonato de calcio, más homogénea que el caliche y generalmente muy compacta y de color verdoso.

LOESS: Los loess son sedimentos eólicos uniformes y cohesivos. Esa cohesión que poseen es debida a un cementante del tipo calcáreo y su color es generalmente castaño claro. El diámetro de las partículas de los loess está comprendido entre 0.01 y 0.05 mm. Los loess se distinguen porque presentan agujeros verticales que han sido dejados por raíces extinguidas. Los *loess modificados* son aquellos que han perdido sus características debido a procesos geológicos secundarios, tales como inmersión temporaria, erosión y formación de nuevo depósito. Debido al contenido calcáreo, los cortes hechos en loess se mantienen generalmente, casi verticales.

DIATOMITA.- Las diatomitas o *tierras diatomáceas* son depósitos de polvo silícico, de color blanco generalmente, compuesto total o parcialmente por residuos de *diatomeas*. Las *diatomeas* son algas unicelulares microscópicas de origen marino o de agua dulce presentando las paredes de sus células características silícicas.

GUMBO.- Es un suelo arcilloso fino, generalmente libre de arena y que parece cera a la vista y al tacto, es pegajoso, muy plástico y esponjoso. Es un material difícil de trabajar.

TEPETATE.- Es un material pulverulento, de color café claro o café oscuro, compuesto de arcilla, limo y arena en proporciones variables, con un cementante que puede ser la misma arcilla o el carbonato de calcio. Según sea el componente predominante, el tepetate se suele llamar *arcilloso, limoso, arenoso, arcillo - limoso* si es que predomina la arcilla, *areno - limoso* si predomina la arena, *limo - arenoso* si predomina el limo y así sucesivamente.

La mayoría de las veces el tepetate debe su origen a la descomposición y alteración, por intemperismo, de cenizas volcánicas basálticas. Pueden encontrarse dentro del tepetate capas o lentes de arena y ceniza basáltica que no tuvieron tiempo de intemperizarse cuando fueron cubiertas por una capa que sí se alteró. También suele encontrarse lentes de piedra pómez dentro del tepetate.

TEMA I

IDENTIFICACIÓN DE ROCAS Y MINERALES

(Traducción del apéndice 3 del libro "Introduction to Rock Mechanics" de Richard E. Goodman, realizada por el Ing. Ricardo Rubén Padilla Velázquez)

¿CUANTAS ROCAS Y MINERALES DEBE CONOCER UN INGENIERO?

Los libros de texto de mineralogía comúnmente enlistan propiedades determinantes para cerca de 200 minerales. Un buen libro de petrografía mencionará más de 1000 tipos de rocas. El tema es interesante y tiene muchas repercusiones prácticas. Afortunadamente, sin embargo, la lista de minerales formadores de rocas más comunes es más bien corta (alrededor de 16) y muchos tipos de rocas caen naturalmente dentro de grupos con atributos ingenieriles similares, de suerte que solamente cerca de 40 nombres de rocas serán suficientes para describir a la mayoría de las de real interés para los fines de la ingeniería civil. Hay casos excepcionales, como puede ser, cuando quizá tipos de rocas_raras_causen_inusuales problemas en excavaciones, o como materiales rocosos. Es posible aprender 1000 variedades con el fin de estar equipado para un caso especial, aunque es más eficiente conseguir el auxilio de un petrólogo cuando suceda esto. Para la educación básica del ingeniero geotecnista, usualmente será suficiente familiarizarse con los 16 minerales y las 40 rocas antes mencionados, esto es, debe ser capaz de identificarlas y distinguir algunas de sus particularidades y propiedades.

MINERALES FORMADORES DE ROCAS

Los minerales más comunes formadores de rocas son los silicatos, carbonatos, y diversas sales (sulfatos y cloruros). Los silicatos se forman a partir de tetraedros de silicio - oxígeno (SiO_4) mutuamente eslabonados en "estructuras en isla", láminas, cadenas, y redes por presencia de hierro, magnesio, calcio, potasio y otros iones. Las estructuras en isla, tales como el olivino, son tetraedros sin esquinas cortadas (estos son los minerales de la más alta temperatura del grupo de los silicatos-tempranamente formados en disolución por enfriamiento-y son generalmente los primeros en interperizarse cuando se exponen a la atmósfera). Las estructuras laminadas (p.ej. mica) se rompen fácilmente (debido a su clivaje o crucero) en una dirección y generalmente presentan baja resistencia al corte a lo largo de esa dirección (paralela a las láminas). Las cadenas (p. ej. los piroxenos y los anfíboles) y redes ligadas a los feldespatos y el cuarzo, son usualmente muy resistentes y durables.

Los carbonatos son soluciones débilmente solubles en agua, pero mucho más solubles si el agua se ha enriquecido con ácido por infiltración a través del suelo o por contaminación industrial. Los carbonatos también tienen la característica de fácil torsión por deslizamiento sobre los planos intracristalinos, tales rocas compuestas por esos minerales se comportan

plásticamente a elevadas presiones. Otras sales (p. ej. yeso y halita) son fácilmente solubles en agua. La piritita está presente en pequeñas cantidades en casi todas las rocas y ocasionalmente se presenta como un porcentaje significativo de éstas.

Los minerales formadores de rocas que usted debe ser capaz de identificar son:

Silicatos

Cuarzo, feldespato, (ortoclasa y plagioclasa), mica (biotita y moscovita), clorita, anfíbol, piroxen y olivino.

Carbonatos

Calcita y dolomita.

Otros

Yeso, anhidrita, halita, piritita y grafito.

La tabla A3.1 le ayudará a identificar esos minerales. Ya que los minerales que forman la textura de la roca están usualmente incrustados en fragmentos o cristales de menos de un centímetro como dimensión máxima, resulta necesario observar a la roca usando una lupa, o mucho mejor, con un microscopio binocular. Los minerales se pueden dividir de esta forma, en aquellos que se pueden rayar con la uña, aquellos que se pueden rayar con una navaja pero no con la uña, y aquellos que no se pueden rayar con una navaja. En la escala de Moh's de dureza relativa, la uña tendrá usualmente una dureza entre 2 y 2.5, al tiempo que el promedio de la navaja tendrá una dureza de entre 5 y 5.5. La presencia o ausencia de clivaje (cruce) es uno de los rasgos de diagnóstico que más fácilmente se puede notar en los minerales que se enlistan. Las superficies de clivaje son pulidas y uniformes, y reflejan la luz incidente uniformemente en una dirección. Los ángulos entre los clivajes se pueden medir girando el espécimen con la mano, para moverse desde la orientación de una reflexión sobre una superficie hasta la orientación de reflexión para la superficie adyacente. Como una ilustración de cómo trabaja la tabla, compare la calcita, el feldespato y el cuarzo, los cuales son tres minerales que los ingenieros frecuentemente confunden. El cuarzo no presenta clivaje y no se puede rayar con una navaja (puede mostrar fases cristalinas; las fases cristalinas se pueden destruir cuando se rompe el cristal, ya que las superficies de clivaje serán reconocibles en todos los trozos minerales después de romper el cristal). El feldespato es más duro que la navaja y también presenta dos buenas direcciones de clivaje. La calcita también tiene buen clivaje pero se puede rayar. Además, la calcita presenta ángulos romboédricos entre las superficies de clivaje (75° y 105°) mientras que los clivajes del feldespato tienen aproximadamente ángulos de 90° entre ellos.

OTROS MINERALES DE IMPORTANCIA

Un pequeño número de minerales explican muchos de los problemas especiales que algunas veces se presentan con las rocas. Esos problemas especiales tienen que ver con la contaminación, el intemperismo rápido, la expansión, el ataque químico de rocas vecinas, el comportamiento indeseable en el concreto, y la muy baja fricción. Algunos de los minerales involucrados son difíciles de identificar en pequeños especímenes, pero el ingeniero debe ser capaz de reconocer los nombres y valorarlos en los reportes geológicos. Los geólogos académicos no siempre están enterados de la influencia de algunas de esas particularidades, las cuales pueden influir sobre las propiedades ingenieriles y en el comportamiento de las rocas. A continuación se muestra una lista parcial de minerales potencialmente problemáticos.

Minerales solubles.

Calcita, dolomita, yeso, anhidrita, sal (halita) y ceolita.

Minerales inestables.

Marcasita y pirrotina.

Minerales potencialmente inestables.

Nontronita (montmorillonita rica en hierro) , nefelina, leucita, micas ricas en hierro.

Minerales cuyo intemperismo desprende ácido sulfúrico.

Pirita, pirrotina y otros sulfuros (minerales en mena).

Minerales con bajos coeficientes de fricción.

Arcillas (especialmente, montmorillonitas), talco, clorita, serpentinita, micas, grafito y molibdenita.

Minerales potencialmente expansivos.

Montmorillonitas, anhidrita y vermiculita.

Minerales que reaccionan o interfieren con el cemento portland.

Ópalo, vidrio volcánico, algunos horstemos, yeso, ceolita y mica.

IDENTIFICACIÓN DE ROCAS COMUNES

Uno no debe esperar ser capaz de asignarle nombre geológico correcto a todos los especímenes muestreados para un proyecto de ingeniería; algunas veces no sólo se requiere un entrenamiento cabal en petrología, sino también un examen petrográfico de una lámina delgada con el fin de determinar el tipo de roca de que se trata. Sin embargo, hay un sistema para identificación de rocas y la mayoría de los ingenieros lo pueden utilizar para volverse razonablemente hábiles para clasificar rocas con una pequeña guía. Se debe apreciar que la clasificación geológica de rocas no promete agrupar a las rocas de acuerdo con las propiedades ingenieriles; de hecho, la primera propuesta consiste en agrupar a las rocas en función de su origen. Sin embargo, el nombre de una roca con una pequeña descripción de la naturaleza y arreglo de las partículas que la componen o cristales, frecuentemente aporta una mejor connotación de valor práctico.

La tabla A3.2 presenta un diagrama de flujo muy simplificado que la ayudará a asignar un nombre a un espécimen desconocido. En muchos casos al usar esta carta, el nombre de un grupo de rocas se puede asignar sin ambigüedades después del examen de una superficie fresca (no intemperizada) o de un espécimen manejable que se desconozca. Como quiera que sea, la carta no es infalible a causa de las fronteras entre diversos grados, los cuales algunas veces se basan en juicios subjetivos, y las cualidades se fijan frecuentemente con diferentes grados comparando entre una muestra y la siguiente. De los muchos atributos que puede presentar un espécimen de roca, solo tres se eligieron predominantemente en esta carta: textura, dureza y estructura.

La mayor división se tiene entre las texturas *crystalina* y *clástica*. Las rocas cristalinas como son el granito, el basalto y el mármol poseen una textura entrelazada de cristales con espacios porosos muy pequeños o inexistentes. Puede haber fronteras definidas por granos rotos y otras fisuras que pueden debilitar a la roca, y los cristales por si mismos pueden ser deformables (p. ej. la calcita en el mármol) pero la matriz es generalmente de buena dureza. En contraste, las rocas clásticas consisten en una colección de partículas de minerales y rocas con espacios porosos semiesféricos más o menos conectados continuamente a través de la roca. A la extensión con que estos espacios porosos estén rellenos de un cementante durable, la roca será resistente y rígida. Algunas rocas clásticas que son duras y de apariencia rocosa contienen sólo arcilla en los espacios entre partículas y se ablandan hasta la consistencia de un suelo al humedecerlas con agua. Algunos especímenes de rocas tienen una granulación tan fina que los granos o cristales no se pueden apreciar con una lupa; en este caso la roca se debe clasificar con otras pruebas.

El segundo índice de clasificación que se usa en la tabla A3.2 es la *dureza*. Sin embargo, esta propiedad esta menos definida como propiedad de una roca que como propiedad de un mineral. La dureza al rayado de una superficie de una roca fresca aporta un índice útil. Por "fresco" se debe entender el ni utilizar especímenes ablandados por intemperismo o con procesos de alteración localizados. Algunas rocas (p.ej. pizarras cloritosas, también llamadas rocas verdes) deben sus características a su alteración hidrotermal, la cual ocurre a considerable profundidad, alterando un gran volumen de roca; esto no debe ser razón para excluir esas rocas como candidatas para fines de identificación, sino más bien para excluir aquellos especímenes intemperizados que cuentan con sondeos vecinos. El rayado de dureza

de una roca no es un índice infalible, como sucede en algunas rocas que muestran diferentes niveles de dureza al rayado de una navaja y en algunas ocasiones se muestran estos límites con una "banda de dispersión" de variabilidad. No obstante, en ciertos casos la prueba de rayado se utiliza, por ejemplo, para distinguir la aplita del mármol, o la hornfelsita de la argilita (también llamada arcillolita). En rocas micáceas, que se revelan como arañadas, bajo el microscopio, que de hecho están compuestas de laminillas fuera de los fragmentos de clivaje comparándolas con una hoja de la navaja, como en una acción de arado. El rayado de dureza usualmente no se utiliza como un índice de clasificación en las rocas clásticas cuarzosas.

Se hace una tercera división entre estructuras *isotrópicas* y *anisotrópicas*. Las rocas metamórficas (p.ej. pizarra, esquisto y gneis), poseen una tendencia incipiente a partirse paralelas a un plano o un eje; consecuentemente, esas rocas presentan anisotropía extrema (direccionalidad) en todas sus propiedades físicas. Algunas rocas sedimentarias (p.ej. lutita, pedernal y caliza fuertemente recostada), poseen semejantes laminaciones con espaciamientos cerrados, que por su misma uniformidad hacen que las muestras presenten una fuerte direccionalidad. En otras rocas, la estructura es masiva para la escala de una muestra manejable (p. ej. arenisca marcadamente recostada, caliza y basalto) de modo que el espécimen aparece como si fuera isotrópico. Algunos granitos son isotrópicos en forma uniforme analizados en la escala de campo. En rocas clásticas cuarzosas, no obstante esto es importante como un atributo físico, el grado de isotropía no se utiliza como un índice de clasificación. La clasificación de esas rocas se efectúa principalmente con base en el tamaño de los granos y de la textura.

Algunos grupos de rocas particulares no se considerarán. Las rocas cristalinas isotrópicas de gran dureza, se presentan en tres formas dependiendo de los tamaños relativos de los cristales: las variedades de grano grueso son *plutónicas* de origen ígneo; aquellas con suficientes cristales gruesos en una matriz de tamaños de cristal invisibles al observarlos con una lupa (textura porfirítica) son de origen *volcánico*; las rocas que se presentan en forma uniforme un grano fino, o porfirítico con un grano fino en la masa de fondo, tienen como origen usualmente el de un *dique*, habiéndose enfriado cerca de la superficie o a una profundidad moderada. Los nombres de la mayoría de esas rocas dentro de esos grupos, refleja cambios en la composición mineralógica que no siempre son significativos desde el punto de vista de la ingeniería. Por ejemplo, la diferencia entre un *granito* y un *granodiorita* se encuentra principalmente en la abundancia relativa de los minerales de ortoclasa y plagioclasa, los cuales son casi idénticos en propiedades físicas. Las variedades oscuras de esas rocas, tales como el gabro y la peridotita, están compuestas de proporciones relativamente grandes de piroxeno y olivino formados tempranamente a una temperatura alta, los cuales se convierten en los más susceptibles a procesos de intemperismo. Las rocas cristalinas duras y anisotrópicas son usualmente un poco más resistentes (p.ej. gneis y anfibolita). Las rocas cristalinas blandas y anisotrópicas donde quedan incluidos los esquistos, en las cuales la suavidad se puede deber a una verdadera incrustación de clorita u otros minerales blandos, o un surcado de micas como previamente se hizo notar.

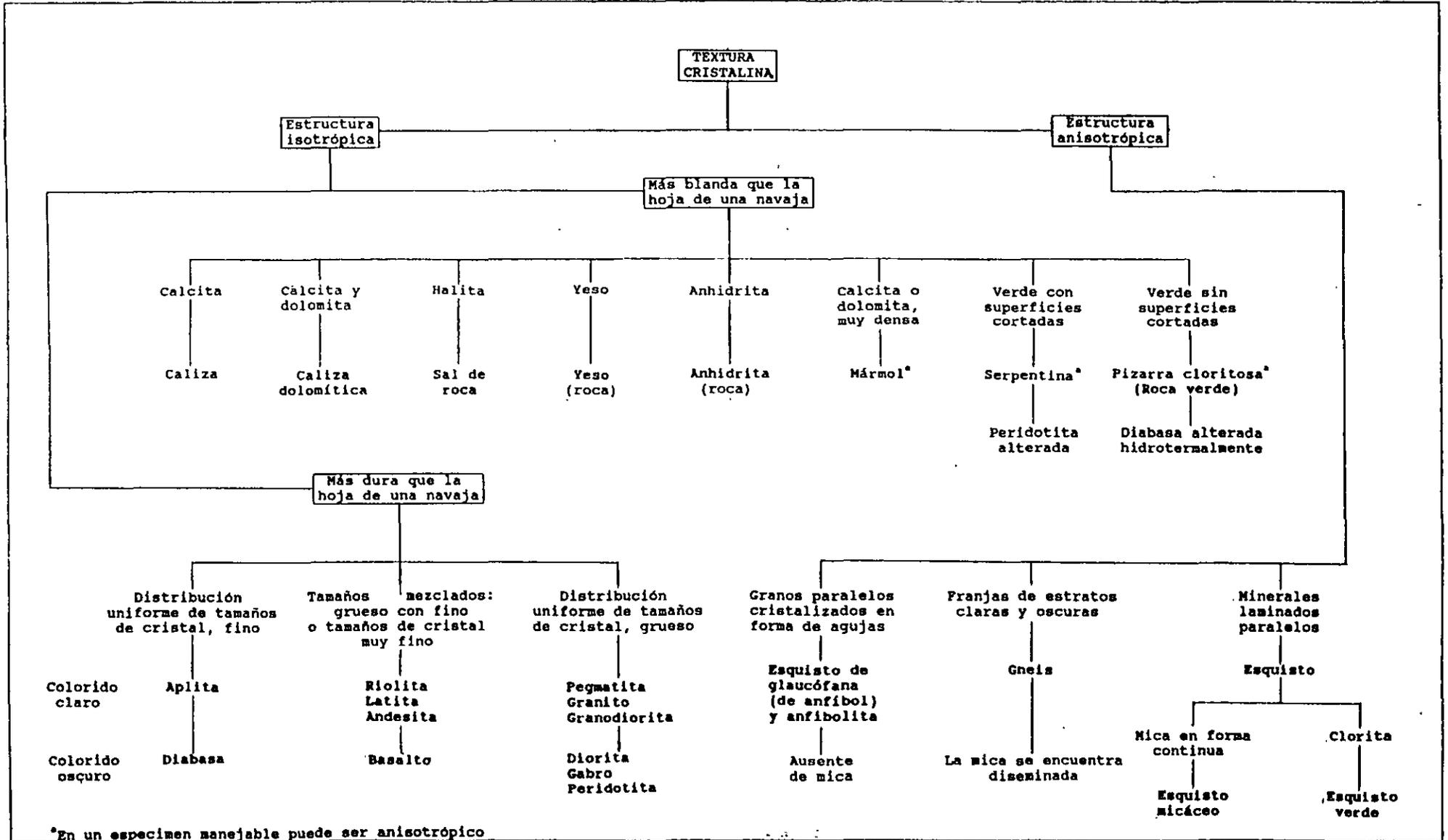
Las rocas cristalinas isotrópicas que se rayan fácilmente engloban a las rocas evaporitas (caliza, dolomita, yeso, anhidrita, sal de roca, etc.) y rocas básicas ígneas alteradas (serpentina y pizarra cloritosa). Todas esas rocas pueden presentar unas propiedades indeseables de debilidad (baja resistencia) y deformabilidad para el ingeniero civil, las serpentinitas en virtud de superficies internas por rotura previa y minerales débiles asociados, y los exquisitos en virtud de las bandas continuas de mica, clorita u otros minerales de baja resistencia al corte.

Las rocas más difíciles de identificar son aquellas sin granos visibles o cristales en los basaltos afaníticos, pedernales lutitas, algunas pizarras y algunas calizas de grano fino y dolomitas que pueden presentar dificultades cuando se examina la dureza y la estructura. Las estructuras y rocas asociadas que se pueden estudiar en el campo, usualmente facilitan mucho la identificación de las rocas.

La tabla A3.3 presenta los periodos geológicos. En la ingeniería práctica, se recomienda que se incluyan con el nombre petrológico de la roca, particularmente en lo referente a rocas sedimentarias. En forma general, las rocas más viejas tienden a ser más duras y con una cementación más permanente. Hay desafortunadamente, importantes y dramáticas excepciones; por ejemplo, arcillas montmorilloníticas no cementadas que se asientan en unidades de roca desde el Paleozoico inferior. Aquellos versados en ingeniería geológica, son de la opinión que los nombres de las eras y periodos en que se forman las rocas se asocian implícitamente a atributos ingenieriles en forma más efectiva que hacerlo con cualquier otra propiedad índice aislada. Muchos trabajadores de mecánica de rocas deben entender la utilidad de esos nombres y emplearlos rutinariamente en la descripción de rocas.

T A B L A A 3 . 2

ESQUEMA DE IDENTIFICACIÓN DE ROCAS



T A B L A A3.2 (continuación 1)

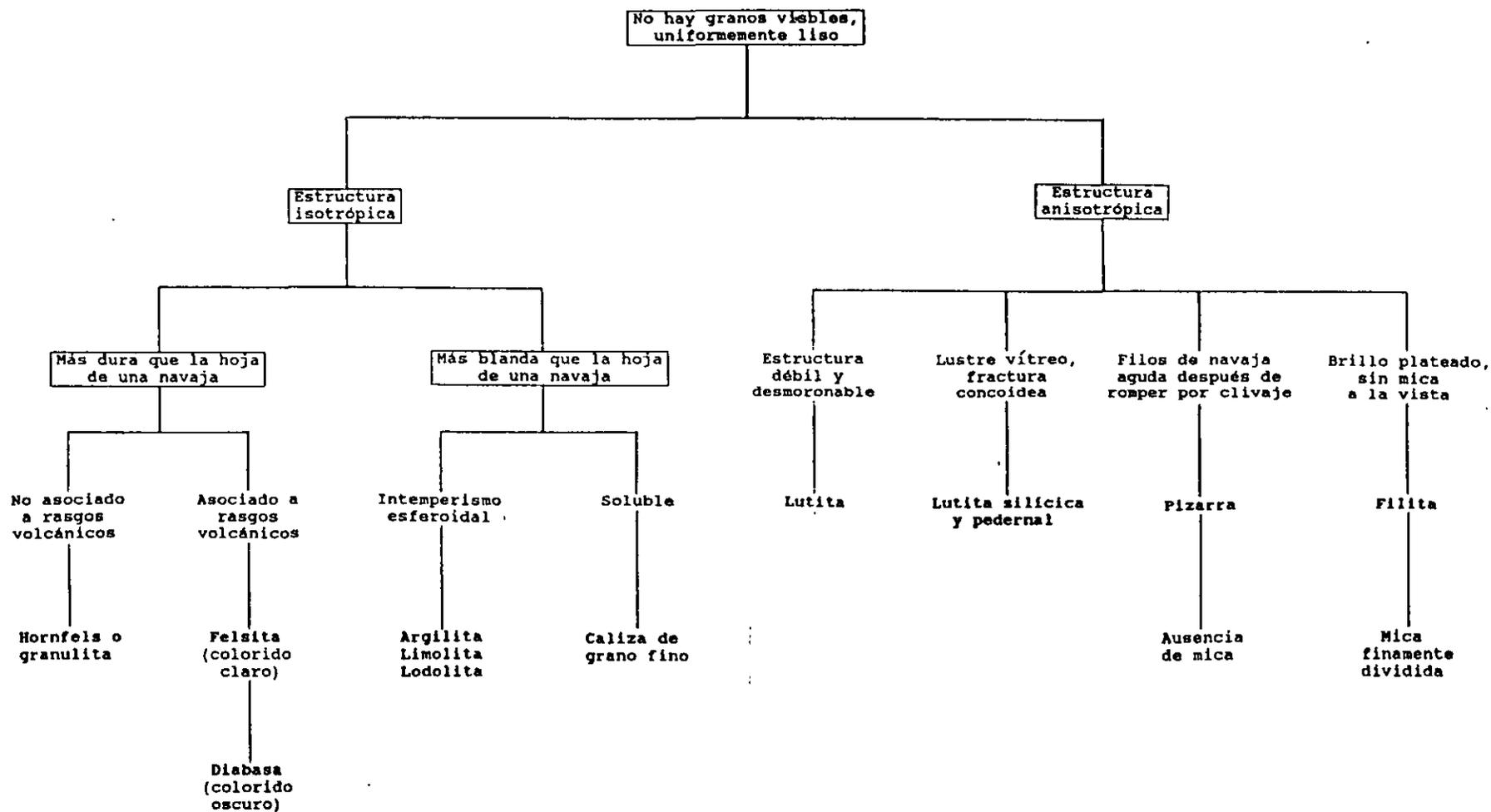
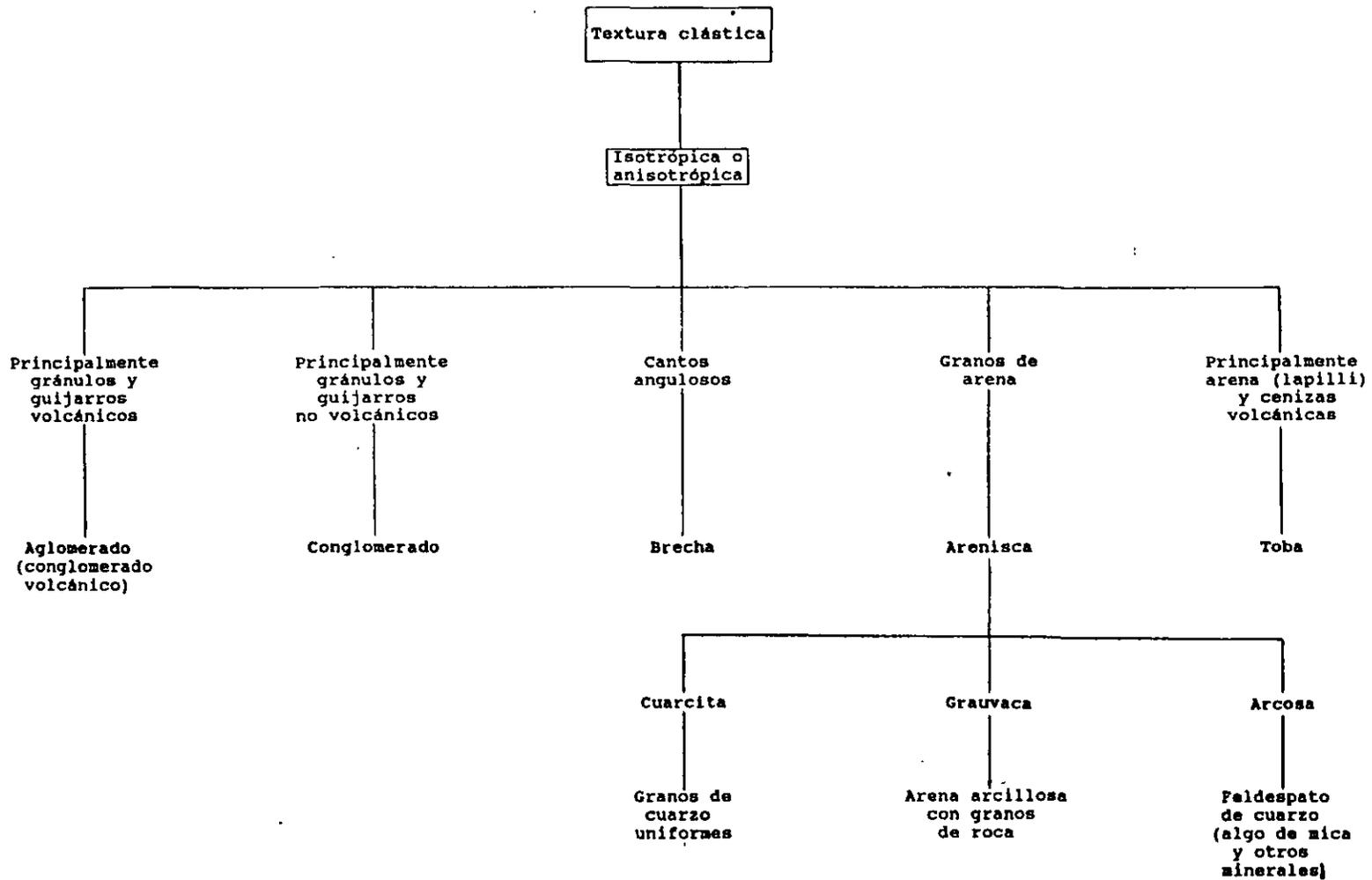


TABLA A3.3
LA ESCALA GEOLOGICA DEL TIEMPO

| ERA | PERÍODO | ÉPOCA | TIEMPO |
|----------------|-------------|---------------|-------------|
| Cenozoico | Cuaternario | Holoceno | 10 000 años |
| | | Pleistoceno | 2 m. a. |
| | | Plioceno | |
| | | Mioceno | |
| | | Terciario | Oligoceno |
| Mezozoico | Cretácico | Eoceno | 65 m. a. |
| | | Jurásico | |
| | | Triásico | 225m. a. |
| Paleozoico | Pérmico | | |
| | | Pennsylvánico | |
| | | Mississípico | |
| | | Devónico | |
| | | Silúrico | |
| | | Ordovícico | 570m.a. |
| Pre - cámbrico | | | |

a : m.a. = millones de años

T A B L A A3.2 (continuación 2)



INTRODUCCION A LA INGENIERIA GOETECNICA.

(Traducción realizada por el Ing. Ricardo Padilla Velázquez de, una parte del capítulo 1 del libro "An Introduction to Geotechnical Engineering", de los autores Robert D.Holtz y William D. Kovacs)

1.1 INGENIERIA GEOTÉCNICA

La *Ingeniería Geotécnica*, como su nombre lo indica, se refiere a la aplicación de la tecnología de la ingeniería civil al manejo de los materiales térreos de la corteza del planeta. Usualmente, el ingeniero geotécnico se ocupa de estudiar sólo los materiales naturales que se encuentran en o cerca de la superficie de la tierra. Los ingenieros civiles denominan a estos materiales térreos como *suelo* y *roca*. El *suelo*, en el sentido ingenieril, es un aglomerado de minerales, materia orgánica y sedimentos, relativamente sin cohesión depositado sobre el lecho de roca. Los suelos se pueden romper o disgregar fácilmente, debido a sus constituyentes minerales o partículas orgánicas. Las *rocas* por el contrario, tienen alta resistencia debido a cohesión interna y fuerzas moleculares, que mantienen unidos a sus granos minerales constituyentes. Esto es cierto, tanto si la roca constituye una estructura masiva firme, como aquella que forma una partícula de grava embebida en un suelo arcilloso.

La frontera que divide a los suelos de las rocas es arbitraria, y muchos materiales naturales que puede uno encontrar en la práctica profesional no son fácilmente clasificables. En ocasiones, se llega a hablar de " rocas muy blandas " o de " suelos muy duros ". Otras disciplinas científicas e ingenieriles tienen diferentes criterios para definir la diferencia entre suelos y rocas. En Geología, por ejemplo, se entiende como *roca* a todos los materiales apoyados en la corteza de la tierra, independientemente de cuantas partículas minerales están reunidas por diversas ligas. Los suelos para los geólogos son precisamente *rocas* descompuestas y desintegradas generalmente apoyadas en la parte superficial más delgada de la corteza y capaz de sustentar la vida superficial. En forma similar, la pedología (ciencia del suelo) y la agronomía coinciden en estudiar las capas más superficiales del suelo, es decir, aquellos materiales de interés en actividades agrícolas y forestales.

Los ingenieros geotécnicos pueden aprender mucho, tanto de la geología como de la pedología. Ambas ciencias, especialmente la ingeniería geológica, son auxiliares importantes para el ingeniero geotécnico y existe un considerable traslape entre estos campos. Sin embargo, las diferencias de terminología, aproximación al sujeto de estudio y objetivos, puede causar alguna confusión, especialmente para los principiantes.

La ingeniería geotécnica tiene diversos aspectos o énfasis. La *mecánica de suelos* es la rama de la ingeniería geotécnica que se ocupa de la ingeniería mecánica y las propiedades de los suelos, mientras que la *mecánica de rocas* se ocupa de la ingeniería mecánica y las propiedades de las rocas, usualmente pero no necesariamente del lecho rocoso. La mecánica de suelos aplica los principios básicos de la mecánica, que incluye cinemática, dinámica, mecánica de fluidos y mecánica de materiales de los suelos. En otras palabras, el suelo, preferentemente al agua, al acero, o el concreto, por ejemplo, ahora la ingeniería de materiales llega a ser aquello cuyas propiedades y comportamiento debemos comprender, con el fin de

construir cosas con ésta. Se puede hacer un comentario similar respecto a mecánica de rocas. Finalmente, se debe hacer notar que existen diferencias significativas entre el comportamiento de las masas de suelo y las masas de rocas, y en principio no hay mucho traslape entre ambas disciplinas.

La *ingeniería de cimentaciones* aplica los conocimientos de la geología, mecánica de suelos, mecánica de rocas, e ingeniería estructural, para posibilitar el diseño y la construcción de cimentaciones en obras de ingeniería civil y otro tipo de estructuras. La ingeniería de cimentaciones debe ser capaz de predecir el comportamiento o la respuesta del suelo o roca donde se cimenta, debido a las cargas que impone la estructura. Algunos ejemplos del tipo de problemas que encara la ingeniería de cimentaciones, incluye el diseño de las cimentaciones para industrias, comercios, edificios residenciales, y otros tipos como estructuras de apoyo para torres de radar, así como las cimentaciones para las instalaciones petroleras como en el caso de tanques y estructuras fuera de costa. Los barcos deber contar con un dique seco durante la construcción o para fines de reparación, de modo de dicho dique debe contar con una cimentación. El apoyo de los cohetes y las estructuras pertinentes durante su construcción y lanzamiento conducen a problemas muy interesantes y desafiantes. Los problemas a que se enfrenta la ingeniería geotécnica en lo que se ha comentado, incluye la estabilidad de taludes naturales y excavados, la estabilidad de las estructuras de retención permanentes o temporales, los problemas de construcción, el control del movimiento y las presiones del agua, así como el mantenimiento y rehabilitación de viejos edificios. La cimentación no sólo debe resistir con seguridad las cargas estáticas de la construcción y estructuras, sino que debe resistir también en forma adecuada las cargas dinámicas debidas a vientos, sismos, etc.

Si usted piensa acerca de esto, llegará a la conclusión de que es imposible diseñar o construir cualquier estructura de ingeniería civil, sin considerar finalmente la cimentación en suelos y en rocas con alguna extensión; y esta es una verdad, tanto si la estructura se construye en la tierra o si se hace en un ambiente extraterrestre. El desempeño, la economía, y la seguridad de cualquier estructura de ingeniería civil, finalmente estará afectada o se puede controlar en función de su cimentación.

Los materiales térreos se utilizan frecuentemente como materiales de construcción, debido a que son los materiales de construcción más baratos posibles. Sin embargo, sus propiedades en condiciones naturales son frecuentemente malas. En muchas ocasiones se deber tomar medidas para densificar, aumentar la resistencia, o por otra parte, estabilizar y amar a los suelos, de modo que se desempeñen satisfactoriamente en condiciones de servicio.

Los terraplenes para carreteras y vías férreas, los campos de aviación, las presas de tierra y enrocamientos, los diques, y los acueductos, son ejemplos de estructuras de tierra (materiales térreos) ; y el ingeniero geotécnico es el responsable de su diseño y construcción. La seguridad de presas viejas son aspectos importantes de esta área de la ingeniería geotécnica. Igualmente emparentado, especialmente para ingenieros en carreteras y campos de aviación, está el diseño del pavimento, el cual es la última capa superficial de la estructura de tierra. En este caso final, el traslape entre las ingenierías de transporte y geotécnica es más bien aparente.

La ingeniería de rocas, análoga para las rocas a lo que es la ingeniería de cimentaciones para los suelos, se encarga del estudio de las rocas como cimentación y como material de construcción. Debido a que la superficie de la tierra está en su mayor parte cubierta por suelo o agua, la ingeniería de rocas usualmente se aplica a obras bajo la superficie (túneles, casas de maquinas subterráneas, cavidades para depósito de petróleo, minas, etc.). Sin embargo, algunas veces la ingeniería de rocas se aplica en obras superficiales, como es el caso de la construcción y cimentación de presas apoyadas en el lecho rocoso, excavaciones profundas en el lecho rocoso, la estabilidad de taludes de roca, etc.

Esta presentación pretende mostrar los problemas típicos a los que se enfrenta el ingeniero geotécnico, que como se puede ver, primeramente, se trata de un campo muy amplio, y en segundo lugar, lo importante que resulta para el correcto diseño y construcción de estructuras en ingeniería civil. En verdad, se puede decir que la ingeniería geotécnica combina las ciencias físicas básicas, la geología y la pedología, con las ingenierías hidráulica, estructural, de transporte, de construcción y de minas.

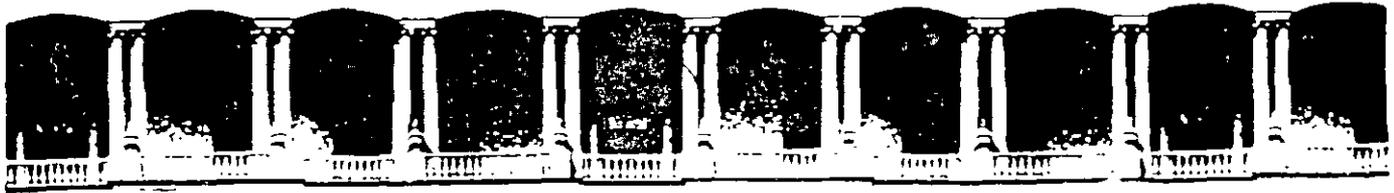
1.2 LA NATURALEZA ÚNICA DE LOS SUELOS Y LAS ROCAS COMO MATERIALES.

La ingeniería geotécnica es altamente empírica, y es quizá más cercana a un "arte" que las otras disciplinas que forman la ingeniería civil. Lo anterior se debe básicamente a que los suelos y rocas con materiales naturales. Frecuentemente se encuentran en estos materiales altas variaciones, entre puntos que pueden tener separaciones de hasta unos cuantos milímetros. Otra forma de expresar esto, es que los suelos son materiales *heterogéneos* antes que *homogéneos*. Es decir, que el material o las propiedades ingenieriles pueden variar ampliamente de un punto a otro en el interior de una masa de suelo. Además, los suelos, en general son materiales *no lineales*, es decir, las relaciones entre esfuerzos y deformaciones no son una línea recta. También, para complicar más las cosas, los suelos son materiales *no conservativos*; esto quiere decir que tienen una memoria fantástica (recuerdan casi todo aquello que les ha sucedido, y este hecho afecta fuertemente su comportamiento ingenieril). En lugar de ser *isotrópicos*, los suelos son típicamente *anisotrópicos*, lo que quiere decir que sus propiedades materiales o ingenieriles no son las mismas en direcciones diferentes.

Muchas de las teorías de que disponemos para modelar el comportamiento mecánico de los materiales que se usan en ingeniería, suponen que los materiales son homogéneos e isotrópicos; y que además obedecen a leyes esfuerzo - deformación lineales. Los materiales de ingeniería comunes, como el acero y el concreto, no se desvían en forma significativa de esos ideales, por lo que se pueden usar teorías lineales simples, con discreción, para predecir su respuesta para cargas de ingeniería. Con los suelos y las rocas no somos tan afortunados. Como podrá usted ver en sus estudios de ingeniería geotécnica, debemos suponer en muchos casos una respuesta esfuerzo - deformación lineal, pero para calcular adecuadamente se deben aplicar grandes correcciones empíricas o factores de "seguridad" a nuestros diseños, para calcular el comportamiento real del material.

Por otra parte, el comportamiento mecánico de los suelos y las rocas *in situ*, está frecuente gobernado o controlado por juntas, fracturas, estratos y zonas débiles, y otros "defectos" en el material. Esta razón impide modelar exitosamente estos materiales en el laboratorio. Es por esto que la ingeniería geotécnica es realmente un "arte", antes que una ciencia de la

ingeniería. El éxito de la ingeniería geotécnica depende del buen juicio y la experiencia del diseñador, constructor o consultor. Por otra parte, el éxito del ingeniero geotécnico consiste en desarrollar un " tacto " sobre el comportamiento de los suelos y las rocas, para más adelante poder diseñar una cimentación en forma segura y económica, o construir con seguridad una estructura de ingeniería.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS I

TEMA

PROPIEDADES ÍNDICE

**CONFERENCISTA
DR. RIGOBERTO RIVERA CONSTANTINO
PALACIO DE MINERÍA
MAYO 2000**

I.- PROPIEDADES INDICE. RELACIONES GRAVIMETRICAS Y VOLUMETRICAS

Dentro de la Mecánica de Suelos, así como en otras áreas de la ingeniería civil, existen relaciones tan importantes que pueden convertirse en definiciones, aún a pesar de que estas relaciones se expresen en forma de fórmulas matemáticas. En los párrafos siguientes se presentarán las relaciones fundamentales de los suelos, en lo referente a sus pesos y volúmenes.

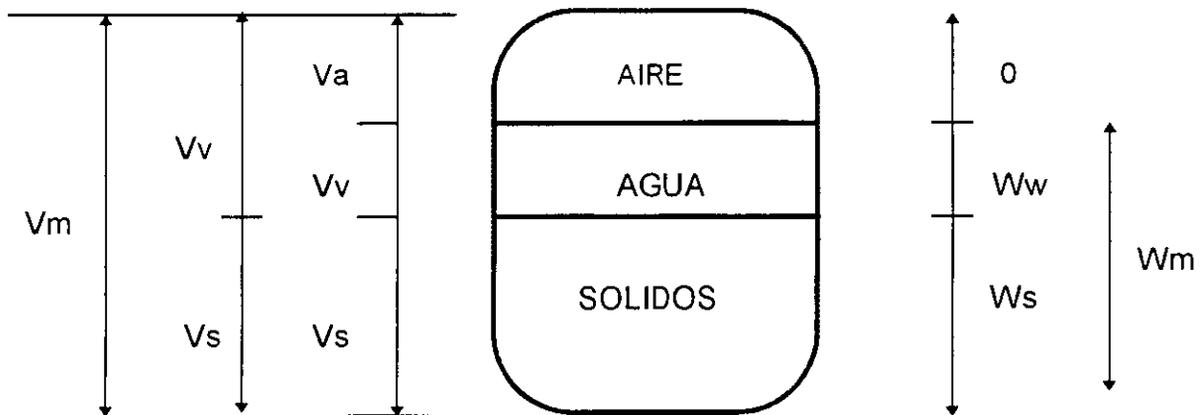
Una manera de visualizar la estructura de un suelo es imaginando que se extrae una muestra cúbica de volumen unitario y realizando una inspección visual detallada, que indicaría que el bloque estaría formado por:

- 1.- Huecos, poros o vacíos, que son los espacios abiertos que existen entre las partículas del suelo.
- 2.- Partículas de suelo, que podrán ser o no ser detectadas a simple vista, y que pueden variar en tamaño, forma, textura, etc.
- 3.- Agua, que puede hacer que el suelo aparezca desde muy húmedo hasta casi seco. El agua de los huecos puede estar en cantidad suficiente para llenar completamente los poros, o puede sólo rodear los granos del suelo. Cuando no se tiene agua, los vacíos están llenos de aire.

Si ahora se toma el cubo de suelo extraído y se pesa antes de que el agua de los poros empiece a drenar, se obtendrá el peso unitario húmedo del suelo (γ_m). En el caso de que todos los huecos estuvieran llenos de agua, el peso resultante sería el peso unitario saturado del suelo (γ_{sat}). Si ahora el cubo se mete a un horno y se seca hasta obtener un peso constante, se obtiene el peso unitario seco (γ_d). Los pesos unitarios obtenidos se representaría por x gramos por centímetro cúbico en el sistema métrico decimal, o x kilonewtons por metro cúbico en el sistema internacional de medidas, recordando que la relación entre ambos sistemas está dado por la siguiente relación :

$$g / cm^3 \times 9.80 / = KN / m^3$$

Así como se realizó el análisis anterior para definir los pesos volumétricos del suelo, se acostumbra usar un esquema que representa al suelo de manera muy simple, y que es utilizado para obtener algunas otras relaciones de carácter fundamental para la comprensión y análisis del comportamiento de los suelos. El esquema mencionado es el siguiente :



Y las relaciones que de el pueden obtenerse son:

a) Relación de vacíos (e). Normalmente usada como decimal.

$$e = V_v / V_s \quad 0 < e < \infty$$

b) Porosidad (n). Expresada en porcentaje.

$$n = (V_v / V_m) \times 100$$

c) Contenido de agua (w). Expresado en porcentaje.

$$w = (W_w / W_s) \times 100$$

d) Grado de saturación (G_w). Expresado en porcentaje.

$$G_w = (V_w / V_v) \times 100$$

e) Densidad de sólidos (S_s).

$$S_s = \gamma_s / \gamma_w = W_s / s \gamma_w$$

f) Peso Volumétrico.

$$\gamma_m = W_m / V_m \quad (\text{de la muestra})$$

$$\gamma_d = W_s / V_s \quad (\text{de los sólidos})$$

$$\gamma' = \gamma_m - \gamma_w \quad (\text{sumergido})$$

EJEMPLO

Un material que se usará para formar taludes de un canal de riego se dejó preparado con peso volumétrico de 2.06 t/m, que corresponde a un contenido de agua del 12%.

Por diversos problemas no se procedió al tendido y compactación del material en la fecha prevista, y éste se secó hasta tener un peso volumétrico de 1.975 t /m . Con el fin de prepararlo nuevamente, es necesario determinar cual es el actual contenido de agua.

EJEMPLO

En otro tramo del canal ya mencionado se usará un suelo que en estado natural tiene un peso volumétrico de 1750 Kg. / m. y un contenido de agua natural de 6 %. Si el proyecto indica que el suelo deberá tener un contenido de humedad de 13%, ¿ Cuantos litros por metro de suelo deberán agregarse para cumplir con las especificaciones del proyecto?.

II.- RELACIONES VOLUMETRICAS Y GRAVIMETRICAS DE LOS SUELOS

En los suelos se distinguen 3 fases constitutivas de la materia.

| | |
|---------------------|---|
| <u>Fase sólida</u> | Formada por partículas minerales. |
| <u>Fase líquida</u> | La constituida por el agua que contiene, pudiendo también presentarse otros líquidos. |
| <u>Fase gaseosa</u> | Formada por el aire principalmente, aunque pueden presentarse otros gases. |

La fase sólida se define como el volumen de sólidos (V_s) y su peso como (W_s) (peso de los sólidos); las fases gaseosas y líquidas juntas se conocen como volumen de vacíos (V_v) la fase gaseosa tiene un volumen (V_a) y la líquida (V_w). El peso de la parte gaseosa se representa con W_a y el de la líquida con W_w .

Combinaciones entre los volúmenes y pesos de estas fases fijan las relaciones volumétricas y gravimétricas de los suelos, las que definen (cualitativamente) las propiedades mecánicas de ellos (los suelos).

Como se definió antes, sea la muestra :

V_a = Volumen de aire

V_w = Volumen de agua

V_s = Volumen de sólidos

V_v = Volumen de vacíos = $V_a + V_w$

V_t = Volumen total de la muestra = $V_a + V_w + V_s = V_t$

W_a = Peso del aire en la muestra, generalmente tomada como 0

W_w = Peso del agua en la muestra

W_s = Peso de los sólidos en la muestra

W_t = Peso total de la muestra = $W_a + W_w + W_s = W_t$

En mecánica de suelos las combinaciones de mayor utilidad para obtener la características cualitativas del suelo se pueden dividir en tres grupos :

IIa) Relaciones adimensionales fundamentales: entre pesos o entre volúmenes

IIb) Relaciones entre pesos y volúmenes

IIc) Relaciones adimensionales entre pesos y volúmenes

IIa) **RELACIONES ADIMENSIONALES FUNDAMENTALES**

$$e = \text{relación de vacíos, oquedad o índice de poros} = \frac{V_v}{V_s}$$

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

$$C_r = \text{Compacidad relativa} = \frac{e_{\max} - e_{\text{nat}}}{e_{\max} - e_{\min}}$$

$$G_w = \text{Grado de saturación} = \frac{V_w}{V_v}$$

$$w\% = \text{Contenido de agua} = \frac{W_w}{W_s} 100$$

IIb) **RELACIONES ENTRE PESOS Y VOLUMENES**

Relacionando el peso de las distintas fases con el volumen respectivo se obtiene el concepto de peso volumétrico. Se definen los siguientes pesos volumétricos.

$$\gamma_o = \text{Peso volumétrico del agua destilada a } 4^{\circ} \text{ C, a la presión atmosférica al nivel del mar} = \frac{W_w}{V_w} \text{ (} W_w \text{ y } V_w \text{ en las condiciones especificadas)}$$

$$\gamma_w = \text{Peso volumétrico del agua en las condiciones de trabajo} = \frac{W_w}{V_w}$$

(W_w y V_w en las condiciones de trabajo) generalmente se acepta que

$$\gamma_o = \gamma_w = 1 \text{ ton/m}^3.$$

$$\gamma_s = \text{Peso volumétrico de la fase sólida del suelo} = \frac{W_s}{V_s}$$

$$\gamma_m = \text{Peso volumétrico de la muestra del suelo} = \frac{W_t}{V_t}$$

Para:

Vacíos secos $\gamma_m = \gamma_d$

Vacíos parcialmente saturados $\gamma_m = \gamma_m$

Vacíos saturados $\gamma_m = \gamma_{sat}$

Suelo sumergido $\gamma_m = \gamma_m$

$$\gamma_d = \text{Peso volumétrico del material seco} = \frac{W_s}{V_t}; \text{ si } W_w = 0$$

$$\gamma_m = \text{Peso volumétrico parcialmente saturado} = \text{peso volumétrico húmedo} = \frac{W_s + W_w}{V_t};$$

si $W_w \neq 0$

$$\gamma_{sat} = \text{Peso volumétrico del material saturado} = \frac{W_s + W_w}{V_t}; \text{ si } V_w = V_v; W_w = V_v \gamma_w$$

$$\gamma_m = \text{Peso volumétrico sumergido} = \gamma_m - \gamma_o$$

IIc) RELACIONES ADIMENSIONALES ENTRE PESOS Y VOLUMENES

Relacionando el peso volumétrico de un material, con otro peso volumétrico tomado como base, se obtiene el concepto de peso específico. En mecánica de suelos, el peso volumétrico que se emplea como base es el del agua $\gamma_0 = 1 \text{ ton/m}^3$.

$S_s =$ Peso específico de los sólidos, la relación entre el peso volumétrico de los sólidos (γ_s) y el peso volumétrico del agua destilada a 4° C a la presión atmosférica al nivel del mar (γ_0).

$$S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_0}$$

$S_m =$ Peso específico de la muestra de suelo :

$$S_m = \frac{\gamma_m}{\gamma_0}$$

$S_{sat} =$ Peso específico saturado :

$$S_{sat} = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_0}$$

$S_{ss} =$ Peso específico saturado sumergido

$$S_{ss} = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_0} - 1$$

II a. RELACIONES ADIMENSIONALES FUNDAMENTALES

DEFINICIONES

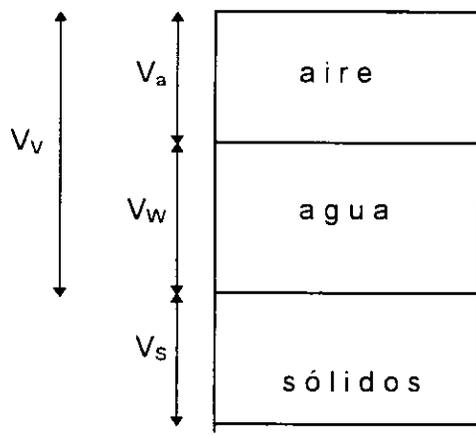
II a 1. Definiciones de volúmenes

En una muestra se tienen tres diferentes fases de la materia, cuyos volúmenes son :

V_a = Volúmenes de gases, aire.

V_w = Volumen de líquidos, agua.

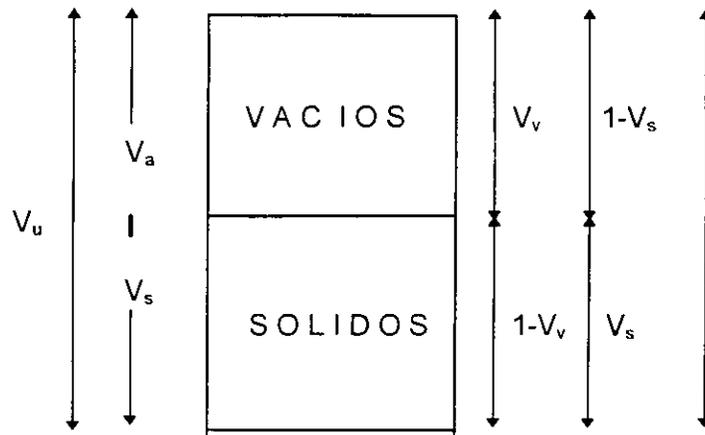
V_s = Volumen de sólidos de diversa mineralogía.



II a 2. Sumando el volumen de aire y agua se define el volumen de vacíos. La relación entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos se denomina relación de vacíos.

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

II a 3. Si el volumen total es unitario, el volumen de vacíos es igual a uno menos el volumen de sólidos o el volumen de sólidos es igual a uno menos el volumen de vacíos.



II a 4. Por definición si el volumen total es unitario, el volumen de sólidos es igual al inverso de la suma de uno más la relación de vacíos.

$$\begin{aligned}
 \text{Si: } & V_v = 1 - V_s \\
 & V_s = V_s \\
 e &= \frac{1 - V_s}{V_s} \\
 \therefore V_s &= \frac{1}{1 + e}
 \end{aligned}$$

- II a 5. Por definición si el volumen total de es unitario, el volumen de vacíos es igual al cociente que resulta de dividir la relación de vacíos entre la suma de uno mas la relación de vacíos.

$$\begin{aligned} \text{Si: } V_v &= V_v \\ V_s &= 1 - V_v \\ e &= \frac{V_v}{1 - V_v} \\ \dots V_v &= \frac{e}{1 + e} \end{aligned}$$

- II a 6. Si la porosidad " n " se define como la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total, de esta definición y la de la relación de vacíos " e " se obtiene " n " como función de " e ".

$$\begin{aligned} n &= \frac{V_v}{V_t} \\ V_t &= 1; V_v = \frac{e}{1 + e} \\ n &= \frac{e}{1 + e} \end{aligned}$$

- II a 7. De las definiciones dadas en (II a 3) , también se puede obtener la relación entre " n " y " e " , sustituyendo en " n " :

$$V_t = 1 \quad \text{y} \quad V_v = \frac{e}{1 + e}$$

$$n = \frac{V_v}{V_v + V_s}$$

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

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

II a 8. La correspondencia entre la relación de vacíos que realmente tiene un suelo y sus valores límites, e_{\max} . Y e_{\min} se llama compacidad relativa " C_R ".

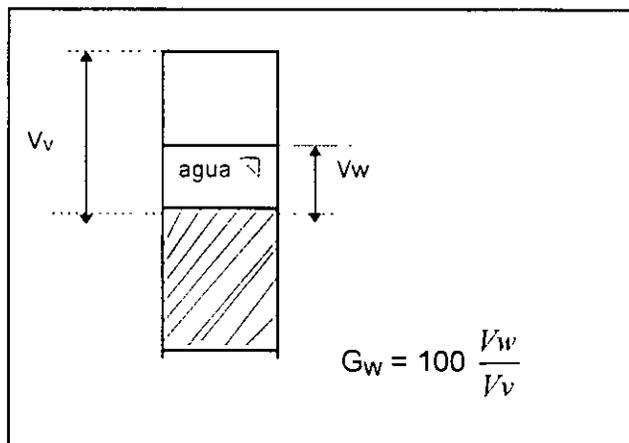
$$C_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} 100$$

II a 9. Se dice que un suelo natural es suelo si su compacidad relativa es menor que 50 por ciento y compacto si es mayor.

$$C_r > 50 \% \text{ Compacto}$$

$$C_r < 50 \% \text{ Suelto}$$

II a 10. Grado de saturación G_w , es la relación en por ciento de volumen de agua que llena los vacíos del suelo.



II a 11.

Definiciones de pesos

En una muestra se distinguen tres diferentes pesos elementales y un peso total:

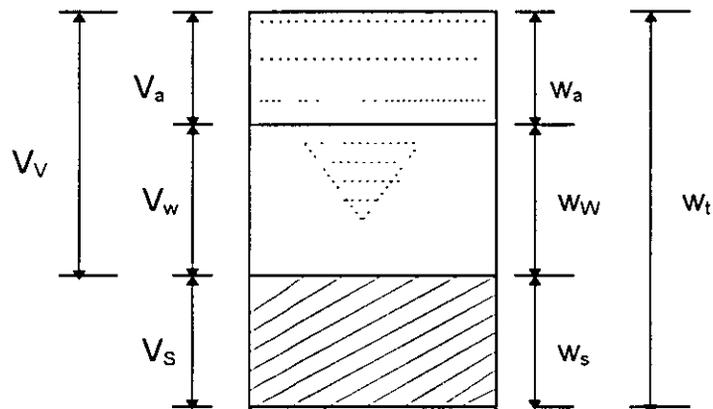
W_a = Peso del aire muy pequeño y no se considera $W_a = 0$.

W_w = Peso del agua .

W_s = Peso de sólidos.

W_t = Peso de la muestra:

$$W_t = W_w + W_s$$



II a 12.

Contenido de agua ω , es el por ciento del peso del agua con respecto al peso de los sólidos.

$$\omega = 100 \frac{W_w}{W_s}$$

II b RELACIONES ENTRE PESOS Y VOLUMENES

- II b 1 de 1 Peso volumétrico de los sólidos se define como la relación entre el peso los sólidos (W_s) y el volumen de los sólidos (V_s)

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

- II b 2. Existen otras relaciones de pesos y volúmenes: peso volumétrico del material seco (γ_d); peso volumétrico del material húmedo (γ_m); peso volumétrico del material saturado (γ_{sat}); peso volumétrico del material sumergido (γ'_m).

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t}$$

$$\gamma_m = \frac{W_s + W_w}{V_t}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{W_s + V_v \gamma_w}{V_t}$$

$$\gamma'_m = \gamma_m - \gamma_w$$

II c 1. RELACIONES ENTRE PESOS Y VOLUMENES

- II c 1. Peso específico de los sólidos, se define como la relación entre el peso volumétrico de los sólidos, que constituyen las partículas de suelo y el peso volumétrico del agua destilada a 4°C a la presión atmosférica al nivel del mar.

$$\frac{\gamma_s}{\gamma_0} = S_s$$

$$S_s = \frac{\frac{W_s}{V_s}}{\frac{W_w}{V_w}} = \frac{W_s}{V_s} \cdot \frac{V_w}{W_w}$$

si $V_w = V_s$

$$S_s = \frac{W_s}{W_w}$$

∴ S_s : (adimensional)

II D DETERMINACION DE LAS RELACIONES VOLUMETRICAS Y GRAVIMETRICAS DE LOS SUELOS.

IID a Relaciones adimensionales fundamentales entre pesos o entre volúmenes.

- | | | |
|-----------|---------------------|----------|
| II D a 1. | Relación de vacíos | e |
| II D a 2. | Porosidad | n |
| II D a 3. | Compacidad relativa | C_r |
| II D a 4. | Grado de saturación | G_w |
| II D a 5. | Contenido de agua | ω |

II D b. Relaciones entre pesos y volúmenes

- | | | |
|-----------|--------------------|----------|
| II D b 1. | Pesos volumétricos | γ |
|-----------|--------------------|----------|

II D c Relaciones adimensionales entre pesos y volúmenes

II D c 1. Pesos específicos S_s

II D a 1. RELACION DE VACIOS

El cociente que resulta de dividir el volumen de vacíos entre el volumen de sólidos (en una muestra de suelo), se le llama relación de vacíos (e). Permite juzgar cualitativamente el acomodo de las partículas en los suelos granulares y la deformabilidad en los suelos finos.

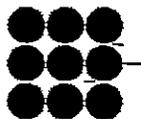
$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Relación de vacíos varía con el acomodo, forma y dimensión de las porciones sólidas del suelo.

Acomodo de las partículas sólidas

Una concepción simplista de la manera en que se modifica la relación de vacíos debido al acomodo de sus partículas, se obtiene al analizar el agrupamiento más compacto y más suelto de un conjunto de esferas.

Acomodo mas suelto



Acomodo más compacto



Fig. 1

Forma de las partículas sólidas

La forma influye en el valor de la relación de vacíos ya que si en lugar de esferas como se analizó anteriormente, se suponen paralelepípedos semejantes a cartas de barajas, el acomodo más compacto es mucho menor que en el caso de las esferas; ya que se puede considerar prácticamente nula la relación de vacíos al acomodarse como un paquete de naipes. El caso más suelto se puede hacer si se arreglan como un castillo de cartas, lo cual da una relación de vacíos mucho mayor que el que da el acomodo de las esferas.

Tamaño de las partículas sólidas.

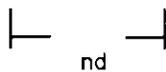
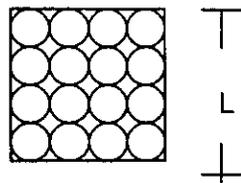
El valor del volumen de sólidos es función de los tamaños de las partículas y para el volumen total dado, el aumento del volumen de sólidos disminuye la relación de vacíos y la disminución del volumen de sólidos, provoca un aumento en la relación de vacíos.

En una estructuración como la de las tarjetas de naipes mencionada, si el naipе es grueso, la relación de vacíos disminuye para acomodados más sueltos. Cuando los naipes son delgados y pequeños se pueden acomodar en forma de caja, uniéndolos por las aristas con lo cual la relación de vacíos se hace muy grande.

Al disminuir el tamaño de los elementos sólidos del suelo disminuyen las fuerzas de cuerpo, que son función del volumen (por ejem. el peso) y las fuerzas de superficie (por ejem. la adherencia), que varían con la disminución del área externa del sólido; la relación entre las fuerzas de superficie y las fuerzas de cuerpo crece a medida que disminuye el tamaño del elemento, porque la relación $\frac{Area}{Volumen} = \frac{A}{V}$ llamada superficie relativa, aumenta al disminuir el volumen del cuerpo, ya que el área es función del cuadrado de la longitud y el volumen del cubo.

Por este hecho al disminuir el tamaño de las partículas, las fuerzas de superficie se hacen muy importantes y pueden llegar a ser mayores que las de volumen, lo cual permite concebir un acomodo que dé una relación de vacíos muy grande, ya que los sólidos pueden arreglarse pegados en los bordes (las fuerzas de superficie son muy grandes comparadas con el peso) hasta formar un volumen hueco como una caja, con un volumen de sólidos muy pequeño; el constituido por el volumen de las paredes de la caja.

OBTENCION DE LA RELACION DE VACIOS PARA EL ACOMODO MAS SUELTO DE ESFERAS



$$L = nd$$

$$V_{total} = L^3 = (nd)^3 = n^3 d^3$$

$$V_{sol} = \frac{4}{3} \pi \cdot R^3 n = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 n = 0.5236 d^3 n$$

$$V_{sol} = 0.5236 d^3 n$$

$$V_v = V_{tot} - V_s$$

$$V_v = n^3 d^3 - 0.5236 d^3 n$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{n^3 d^3 - 0.5236 d^3 n}{0.5236 d^3 n}$$

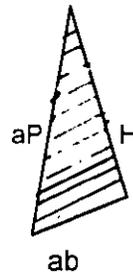
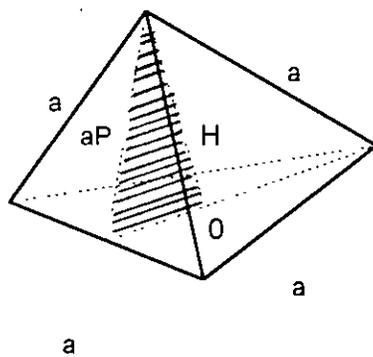
$$e = \frac{n^3 d^3}{0.5236 d^3 n} - 1$$

$$e_{n \rightarrow \infty} = \frac{n^3}{0.5236 n} - 1 = 1.91 - 1$$

$$e = 0.91$$

Un acomodo más compacto de esferas es cuando forman un tetraedro.

La Relación de Vacíos en este caso se obtiene:



$$a = nd$$

$$a_p = H^2 + ab^2$$

$$S = a^2 \sqrt{3}$$

$$O = \text{Baricentro}$$

$$a_p = a \sqrt{\frac{3}{2}}$$

$$a_b = \frac{2\sqrt{3}}{6}$$

$$\text{Volumen } V_t = a^3 \sqrt{\frac{2}{12}}$$

n = número de esferas
d = diámetro de las esferas
S = superficie

Para la primera capa el N_0 de esferas es :

$$1- n + (n-1) + (n-2) + (n-3) + \dots + 1$$

$$= \frac{(n+1)(n)}{2} = \frac{1}{2}(n^2 + n)$$

Para la segunda capa

$$2- \frac{1}{2}(n-1)n = \frac{1}{2}(n^2 - n)$$

Para la tercera capa

$$3- \frac{1}{2}(n-2)(n-1) = \frac{1}{2}(n^2 - 3n - 2)$$

Así sucesivamente.

Para un número de n esferas el total de ellas es:

$$\Sigma = \frac{1}{2}(\Sigma n^2 + \Sigma n) \quad \text{ó} \quad S = \frac{n(n+1)(n+2)}{6} = \text{número total de esferas}$$

$$S = \frac{1}{6}(n^3 - 3n^2 + n)$$

El volumen de los sólidos será:

$$V_s = \frac{\pi}{6} d^3 S$$

El volumen total será:

$$V_T = a^3 \sqrt{\frac{2}{12}} = n^3 d^3 \sqrt{\frac{2}{12}}$$

El volumen de vacíos

$$V_V = V_T - V_s = n^3 d^3 \sqrt{\frac{2}{12}} - \frac{\pi}{6} d^3 S$$

En el ejemplo de las esferas se encontró que la e_{\max} es 0.91, en cambio la relación de vacíos media del primer estrato deformable de la ciudad de México, resulta de 6.9; esta diferencia se explica si se toma en cuenta que las partículas de arcillas de la Ciudad de México son muy pequeñas y alargadas, en forma de hojuelas o de pabillos, lo cual permite una estructuración de castillo de naipes de dimensiones sumamente reducidas.

Las partículas sólidas que forman la primera agrupación de castillo de naipes se denomina estructuración primaria y junto con otras semejantes, forma también grumos de tamaño diminuto con un peso muy reducido, por lo cual las fuerzas de adherencia entre estos grumos secundarios y otros análogos, da la oportunidad de que se creen grumos mayores, de estructuración terciaria que son los que se detectan a primera vista en las arcillas de la Ciudad de México.

La primera estructuración (partículas sólidas con partículas sólidas), se denomina estructuración primaria, la unión de estructuraciones primarias que forman el primer grupo mencionado anteriormente, constituye la estructuración secundaria. la estructuración terciaria como la de la Ciudad de México se presenta al unirse grumos de estructuración secundaria y también se llama panaloide. El acomodo de las partículas finas permite explicar el fenómeno que se presenta al remodelarse las arcillas. Al modificarse la estructura original se disminuye la relación de vacíos y la resistencia del suelo, también aumenta la deformabilidad dado que la nueva estructuración no tiene la misma adherencia entre grumos que tenía en estado original; como sucede al romperse la estructura de un edificio que ya es incapaz de resistir los esfuerzos que soportaba estando entera.

Al quedar en reposo las arcillas remodeladas, se generan las interacciones entre grumos y se recupera gran parte de las características de resistencia y deformabilidad que originalmente tenía el suelo, éste fenómeno se denomina " TIXOTROPIA ".

Obtención de la relación de vacíos

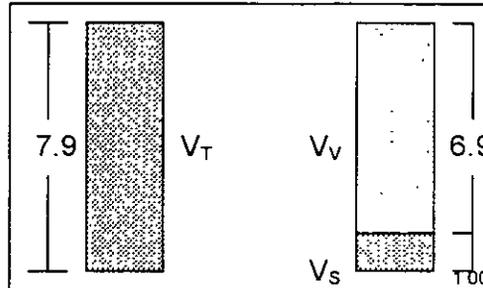
Para determinar la relación de vacíos se mide el volumen total de la muestra labrándola en forma regular que permita el cálculo del volumen o bien midiendo la muestra con mercurio; en este último caso la muestra de forma irregular se sumerge dentro de un recipiente, el volumen de mercurio desplazado será el volumen total de ella. Por otra parte si la muestra se seca a 100°C durante 24 horas y posteriormente se pesa, se obtienen por definición el peso de los materiales sólidos secos (W_s), este peso dividido entre el peso volumétrico de los sólidos, dará el volumen de sólidos (V_s); por consiguiente para obtener la relación de vacíos se divide la diferencia entre el volumen total y el volumen de sólidos entre el volumen de sólidos.

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_T - V_s}{V_s} = \frac{V_T}{V_s} - 1 \quad \%$$

Por ejemplo en la relación de vacíos media de la ciudad de México

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

$$e = \frac{V_T}{V_s} - 1 \therefore V = V_s + \underbrace{6.9}_{V_v}$$



Otra forma de obtener la relación de vacíos es fijarla en función del peso específico y de peso volumétrico seco de la muestra:

sea :

V_T = Volumen total de la muestra

W_s = Peso seco de la muestra obtenido después de secar la muestra a 110°C durante 24 horas, y pesado en una balanza de precisión con una aproximación de 0.1 gr.

S_s = Peso específico de los sólidos

$$S_s = \frac{\gamma_s W_s}{\gamma_0 V_{s\gamma_0}}$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_T}{V_s} - 1$$

$$V_s = \frac{W_s}{S_s \gamma_0}$$

$$e = \frac{V_T S_s \gamma_0}{W_s} - 1$$

$$e = \frac{V_T \gamma_s}{W_s} - 1 = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$$

$$e = \frac{S_s \gamma_0}{\gamma_d} - 1$$

RELACION DE VACIOS

Se mide el volumen total de la muestra (V_t)

Se seca la muestra al horno a 100°C durante 24 hrs.

Se pesa la muestra seca y se obtiene el peso de los materiales sólidos

$$W_s$$

El peso de los materiales sólidos se divide entre el peso volumétrico de los sólidos y se obtiene el volumen de los sólidos.

$$V_s = \frac{W_s}{\gamma_s}$$

La diferencia entre el volumen total y el volumen de los sólidos, es el volumen de vacíos.

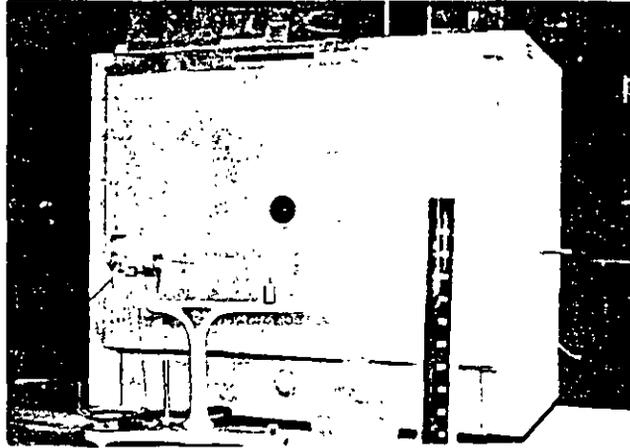
$$V_v = V_t - V_s$$

El volumen de vacíos se divide entre el volumen de los sólidos, el cociente es la relación de vacíos

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

FIN

OBTENCION DE LA RELACION DE VACIOS.

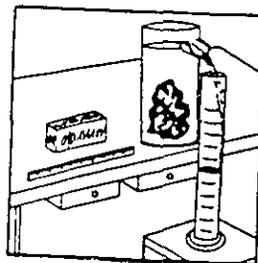


1.- EQUIPO

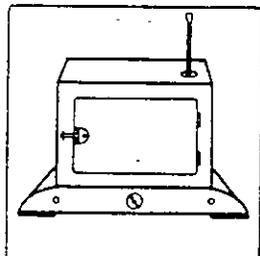
- a) Recipiente con mercurio
- b) Horno de secado
- c) Balanza de precisión
- d) Probeta graduada

1.- Para determinar la relación de vacíos, se mide el volumen total directamente en una muestra labrada rectangularmente. Si la muestra es irregular, se sumerge ésta dentro de un recipiente con mercurio, el volumen desplazado, será el volumen total de la muestra.

V_t

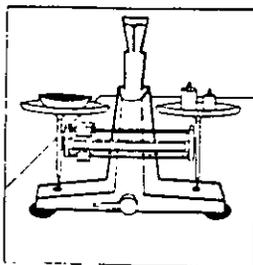


2.- Se seca la muestra en el horno durante 24 horas a 100°C.



3.- Se pesa la muestra seca y se obtiene el peso de los materiales sólidos.

W_s



4.- Se divide el peso de los materiales sólidos entre el peso volumétrico de los sólidos " γ_s ", para obtener el volumen de sólidos.

$$V_s = \frac{W_s}{\gamma_s}$$

$$V_s = \frac{W_s}{\gamma_s} = \frac{W_s}{\rho_s \gamma_0}$$

5.- El peso volumétrico de los sólidos " γ_s ", se obtiene a partir de la relación :

$$S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

$$S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

6.- La diferencia entre el volumen total menos el volumen de sólidos dará el volumen de vacíos

$$V_T - V_s = V_v$$

$$V_v = V_T - V_s$$

7.- Se divide el volumen de vacíos entre el volumen de sólidos para obtener finalmente la relación de vacíos.

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

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_T - V_s}{V_s} = \frac{V_T}{V_s} - 1$$

U N A M
 FACULTAD DE INGENIERIA
 INGENIERIA CIVIL
 GEOTECNIA

RELACION DE VACIOS Y POROSIDAD

| | |
|---|---|
| OBRA : _____ LOCALIZACION : _____ SONDEO N° _____ ENSAYE: _____ MUESTRA N : _____ PROF. _____ DESCRIPCION : _____ | FECHA : _____ OPERADOR : _____ CALCULO : _____ _____ |
|---|---|

| Volumen total de la muestra V_T | Peso de los sólidos W_s | Peso volumé- trico de los sólidos γ_s | Volumen de sólidos $V_s = W / \gamma_s$ | Volumen de vacíos $V_v = V_T - V_s$ | Relación de vacíos $e = V_v / V_s$ | Porosidad $\eta = V_v / V_T$ | ENSAYE # |
|---|---------------------------------|--|---|---|--|---------------------------------|-------------|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

ACLARACIONES : _____

OBSERVACIONES : _____

DURANTE LA OBTENCION DE LA RELACION DE VACIOS SE PUEDEN COMETER LOS SIGUIENTES ERRORES

- 1 - Al medir el volumen de mercurio desplazado por la muestra.
- 2.- No tener la muestra el tiempo suficiente en el horno a la temperatura adecuada.
- 3.- Obtener malas pesadas.

IIDa2. POROSIDAD

La porosidad relaciona el volumen de vacíos del suelo con el volumen total que éste tiene, esta propiedad se utiliza con los mismos propósitos que la relación de vacíos. Conocida la relación de vacíos la porosidad se puede obtener con la siguiente expresión.

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

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

$$n = \frac{V_v}{V_v + V_s}$$

La porosidad permite visualizar la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total. la variación del volumen total de la muestra se puede expresar con la variación de la relación de vacíos o con la de la porosidad. En el primer caso la variación del volumen, modifica sólo el volumen de vacíos y mantiene constante el denominador, (dado que por hipótesis el volumen de sólidos es invariante) ; en cambio al expresar la modificación con la porosidad, cambian el numerador (el volumen de vacíos) y el denominador (el volumen total), lo que dificulta las operaciones matemáticas, por esta razón se utiliza más la relación de vacíos que la porosidad.

POROSIDAD

Se mide el volumen total de la muestra.

$$V_T$$

Se seca la muestra al horno a 100°C durante 24 horas.

Se pesa la muestra seca y se obtiene el peso de los materiales sólidos.

$$W_s$$

El peso de los materiales sólidos se divide entre el peso volumétrico de los sólidos y se obtiene el volumen de los sólidos.

$$V_s = \frac{W_s}{\gamma_s}$$

La diferencia entre el volumen total y el volumen de sólidos, es el volumen de vacíos

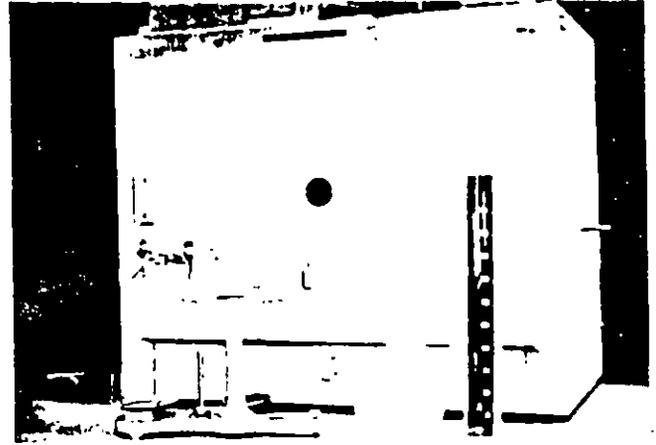
$$V_v = V_T - V_s$$

Se obtiene la Porosidad

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

FIN

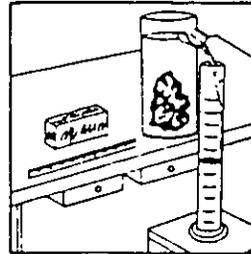
OBTENCION DE LA POROSIDAD



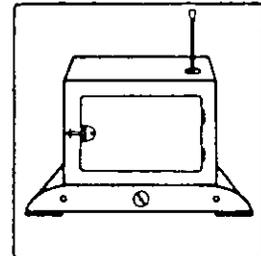
1.- EQUIPO

- a) Recipiente con mercurio
- b) Horno de secado
- c) Balanza de precisión
- d) Probeta graduada

1.- Se mide el volumen total de la muestra, labrándola rectangularmente y si no es posible y tiene forma irregular, se sumerge dentro de un recipiente con mercurio ; el volumen desplazado será el volumen de la muestra.

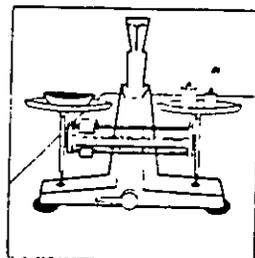


2.- Se seca la muestra al horno durante 24 horas a 100°C



3.- Se pesa la muestra seca y se obtiene el peso de los materiales sólidos:

W_s



4.- Se divide el peso de los materiales sólidos entre el peso volumétrico de los sólidos " γ_s " para obtener el volumen de sólidos.

$$V_s = \frac{W_s}{\gamma_s}$$

$$V_s = \frac{W_s}{\gamma_s}$$

5.- El peso volumétrico de los sólidos " γ_s " se obtiene a partir de la relación :

$$S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_o}$$

$$S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_o}$$

6 - La diferencia entre el volumen total menos el volumen de sólidos dará el volumen de vacíos

$$V_T - V_s = V_v$$

$$V_v = V_T - V_s$$

7.- Se divide el volumen de vacíos entre el volumen total y se obtiene la " POROSIDAD ".

$$n = \frac{V_V}{V_T}$$

DURANTE LA OBTENCION DE LA POROSIDAD , SE PUEDEN COMETER LOS SIGUIENTES ERRORES.

- 1.- Al medir el volumen del mercurio desplazado por la muestra
- 2.- No tener la muestra el suficiente tiempo en el horno a la temperatura adecuada
- 3.- obtener malas pesadas

IIDa3. COMPACIDAD RELATIVA

El parámetro compacidad relativa (C_r) permite describir la compacidad de un suelo arenoso de manera concisa; entendiéndose por compacidad de relación que mide el grado de acomodo de las partículas constitutivas de los suelos y se expresa de la forma siguiente:

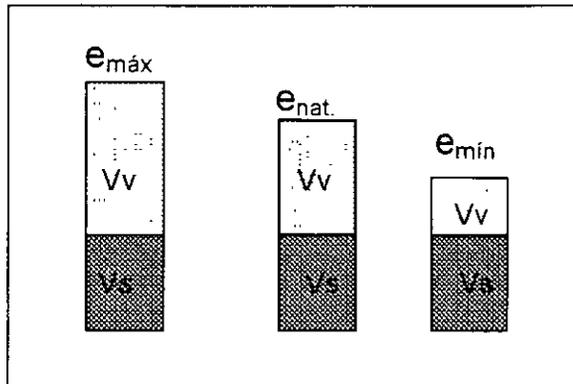


Fig. 3.

$$C_r = \frac{e_{\max} - e_{\text{nat}}}{e_{\max} - e_{\min}}$$

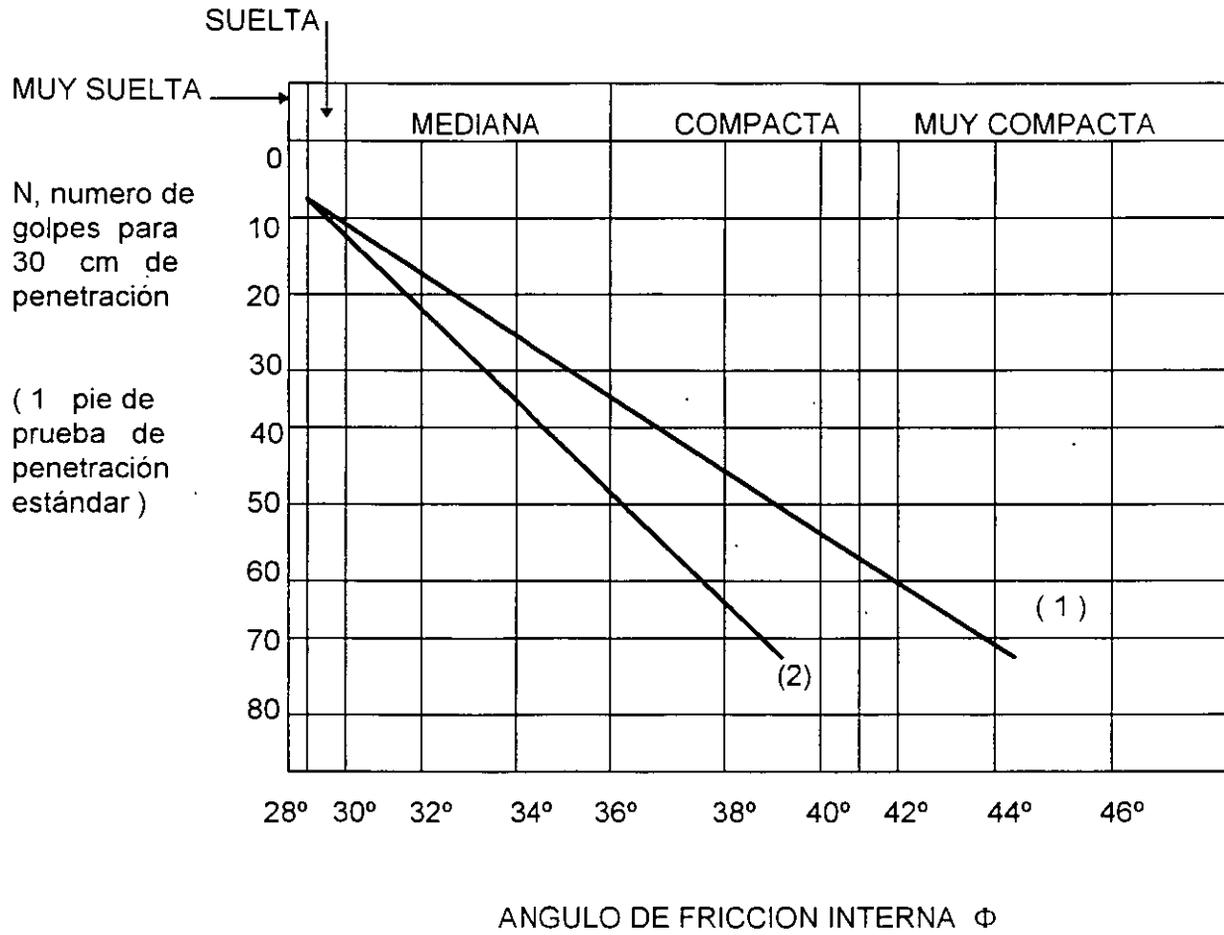
La obtención de la compactación relativa es difícil de realizar ya que la determinación de la e_{\max} (relación de vacíos máxima) y e_{\min} (relación de vacíos mínima), dependerá del procedimiento de compactación que se utilice.

Para la determinación de la compactación relativa (C_r) en arenas, se acepta que el estado más suelto (el cual define a e_{\max}) se obtiene dejando caer libremente la arena en estudio, en estado seco en un recipiente de volumen conocido; al estado más compacto de suelo corresponde e_{\min} y se obtiene vibrando el recipiente con el material seco obteniéndose un mejor acomodo de partículas; al estado natural correspondiente, la e_{nat} la cual determina la muestra obtenida en el sitio.

Algunos autores emplean la palabra Densidad Relativa al referirse a la Compactación Relativa.

El concepto de compactación relativa se introdujo para estimar el acomodo de partículas de un suelo granular tal como se encuentra en la naturaleza y permite estimar cualitativamente las propiedades mecánicas de los suelos, en la fig. 4 se muestra la relación empírica entre C_r y los parámetros de la resistencia al esfuerzo cortante, cohesión C y ángulo de fricción interna, también en la fig. 5 se muestra el número de golpes de perforación estándar y la compactación.

COMPACIDAD RELATIVA (C_r)



- 1) Arena angulosa o redondeada de mediana a gruesa
- 2) Arena fina limosa

Fig. 4

| NORMAS PARA CALIFICAR LA CONSISTENCIA EN LOS SUELOS COHESIVOS Y LA COMPACIDAD DE LAS ARCILLAS | | |
|---|-------------------------------|--------------|
| ARCILLAS Y LIMOS PLASTICOS | | |
| CONSISTENCIA | COMPRESION SIMPLE | No DE GOLPES |
| MUY BLANDA | MENOR DE 2.5 T/M ² | MENOR DE 2 |
| BLANDA | 2.5 - 5.0 " | 2 - 4 |
| POCO FIRME | 5.0 - 10.0 " | 4 - 8 |
| FIRME | 10.0 - 20.0 " | 8 - 15 |
| MUY FIRME | 20.0 - 40.0 " | 15 - 30 |
| MUY DURA | MAYOR DE 40 " | MAYOR DE 30 |
| ARENAS | | |
| COMPACIDAD | No. DE GOLPES | |
| MUY SUELTA | MENOR DE 4 | |
| SUELTA | 4 - 10 | |
| POCO COMPACTA | 10 - 30 | |
| COMPACTA | 30 - 50 | |
| MUY COMPACTA | MAYOR DE 50 | |

Correlación entre el número de golpes de la prueba de penetración estándar, con la compacidad o consistencia del material explorado.

Fig. 5

La tabla siguiente relaciona la compacidad relativa con el estado del suelo.

| Compacidad relativa | Descripción |
|---------------------|-------------|
| 0.15 | Muy suelto |
| 0.15 - 0.35 | Suelto |
| 0.35 - 0.65 | Medio denso |
| 0.65 - 0.85 | Denso |
| 0.85 - 1.00 | Muy Denso |

Tabla 2

No existe en la actualidad un procedimiento preciso para la obtención de la compacidad relativa de los suelos (C_r), dado que no se ha definido cual es el estado más suelto y el más compacto del suelo.

En este trabajo se explicará un procedimiento por el cual se puede obtener la compacidad relativa en función de los pesos volumétricos. La compacidad relativa se puede expresar en función de los diferentes pesos volumétricos del suelo para diferentes grados de compactación, en la fôrma en que se muestra en la hoja

El procedimiento para la obtención de la " Compacidad relativa " consiste en la determinación de los diferentes pesos volumétricos secos (γ_d), natural, máximo y mínimo.

Para la obtención del peso volumétrico seco natural ($\gamma_{d \text{ nat}}$) se toma una muestra de suelo donde se desea conocer la compacidad relativa (C_r) (generalmente la muestra extraída es de aproximadamente 5 lts.) esta muestra obtenida se seca y se pesa obteniéndose el peso (W_s) y para la obtención del peso volumétrico seco natural se divide este peso entre el volumen de la muestra (V_m).

Este volumen es igual al del recipiente.

$$\gamma_{d \text{ nat}} = \frac{W_s}{V_m}$$

Para la obtención del peso volumétrico seco mínimo ($\gamma_{d \text{ min}}$) la muestra seca se disgrega sin romper los granos sólidos del suelo y se deposita en un recipiente de volumen y peso

conocido (film 4 pág. 54), por medio de un cucharón de lámina dejando caer el suelo de 30 cm, de altura a través de un embudo de 2.5 cm. de diámetro, cuando el recipiente esté lleno se enrasa teniendo cuidado de no compactarlo y se pesa (W_t) a este peso se le resta el recipiente (W_r) y se obtiene el peso de los sólidos (W_s). Dividiendo este peso entre el volumen del recipiente (V_m) se obtiene el peso volumétrico seco mínimo (γ_{dmin})

$$\gamma_{dmin} = \frac{W_s}{V_m}$$

El peso volumétrico seco máximo (γ_{dmax}) se obtiene depositando la muestra en tres capas iguales en el recipiente, compactando cada capa por medio de un martinete (fig. 8) dándole 25 golpes uniformemente repartidos a cada capa; terminada la compactación se enrasa y se pesa (W_t). Este peso, menos el peso del recipiente (W_r) dará el peso de los sólidos (W_s) dividiéndolo entre el volumen del recipiente (V_m) dará el peso volumétrico seco máximo (γ_{dmax}).

$$\gamma_{dmax} = \frac{W_s}{V_m}$$

LA COMPACIDAD RELATIVA (C_r) PUEDE EXPRESARSE EN FUNCION DE LOS PESOS VOLUMETRICOS EN LA FORMA SIGUIENTE:

$$C_r = \frac{e_{max} - e_{nat}}{e_{max} - e_{min}} \times 100$$

$$\gamma_{dmax} = \frac{W_s}{V_s + V_{v_{min}}} = \frac{V_s \gamma_s}{V_s + V_{v_{min}}} = \frac{\gamma_s}{1 + e_{min}}$$

$$\gamma_{dmin} = \frac{\gamma_s}{1 + e_{max}} \quad \gamma_{dnat} = \frac{\gamma_s}{1 + e_{min}}$$

$$e_{\min} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{d\max}} - 1 = \frac{\gamma_s - \gamma_{d\max}}{\gamma_{d\max}}$$

$$e_{\max} = \frac{\gamma_s - \gamma_{d\min}}{\gamma_{d\min}}$$

$$e_{\text{nat}} = \frac{\gamma_s - \gamma_{d\text{nat}}}{\gamma_{d\text{nat}}}$$

$$C_r = \frac{\frac{\gamma_s - \gamma_{d\min}}{\gamma_{d\min}} - \frac{\gamma_s - \gamma_{d\text{nat}}}{\gamma_{d\text{nat}}}}{\frac{\gamma_s - \gamma_{d\min}}{\gamma_{d\min}} - \frac{\gamma_s - \gamma_{d\max}}{\gamma_{d\max}}} = \frac{\frac{\gamma_s}{\gamma_{d\min}} - \frac{\gamma_s}{\gamma_{d\text{nat}}}}{\frac{\gamma_s}{\gamma_{d\min}} - \frac{\gamma_s}{\gamma_{d\max}}}$$

$$C_r = \frac{\frac{1}{\gamma_{d\min}} - \frac{1}{\gamma_{d\text{nat}}}}{\frac{1}{\gamma_{d\min}} - \frac{1}{\gamma_{d\max}}} = \frac{\frac{\gamma_{d\text{nat}} - \gamma_{d\min}}{\gamma_{d\min} \cdot \gamma_{d\text{nat}}}}{\frac{\gamma_{d\text{nat}} - \gamma_{d\min}}{\gamma_{d\min} \cdot \gamma_{d\max}}} = \frac{\gamma_{d\max}}{\gamma_{d\text{nat}}} * \frac{\gamma_{d\text{nat}} - \gamma_{d\min}}{\gamma_{d\max} - \gamma_{d\min}}$$

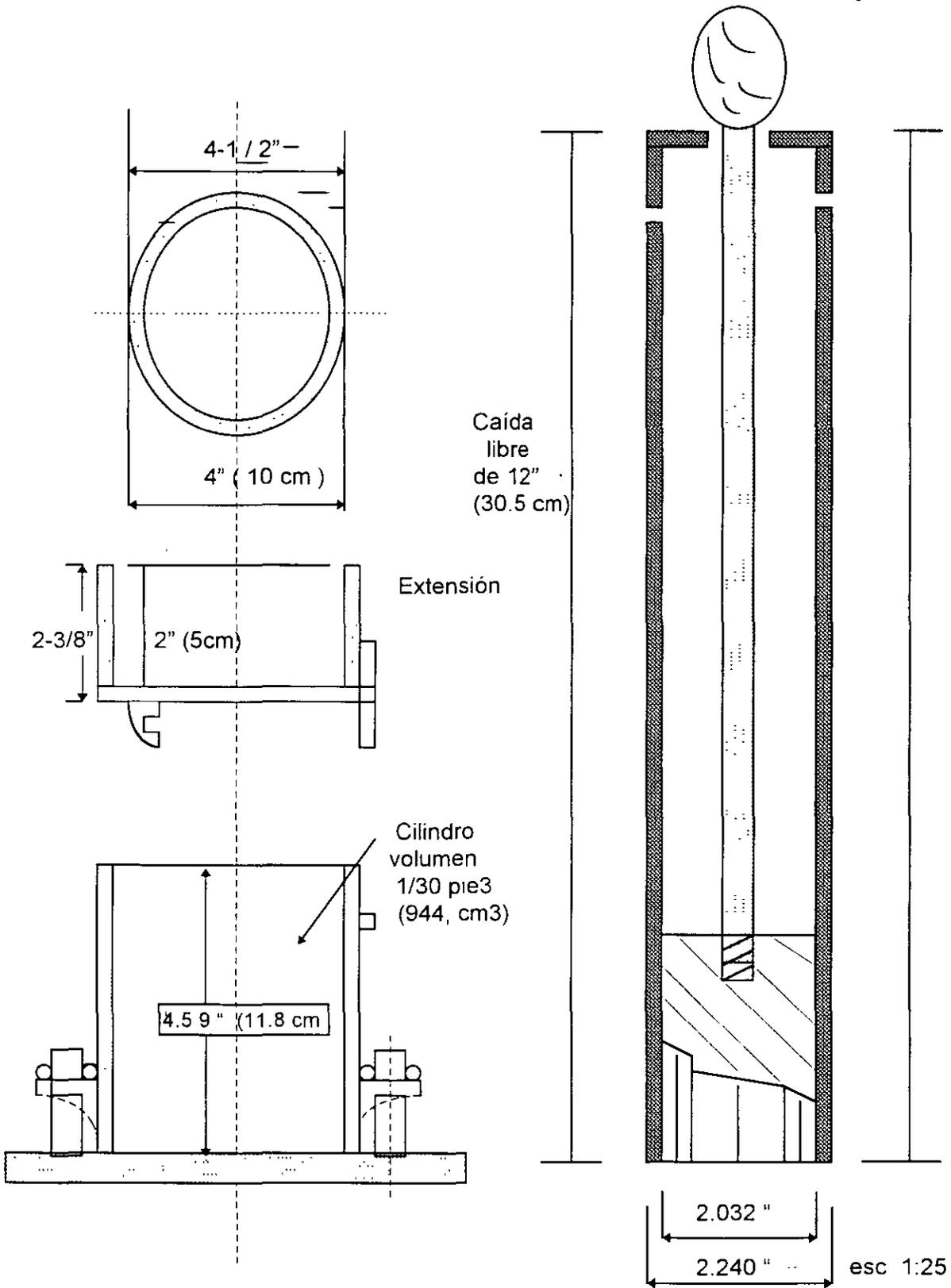
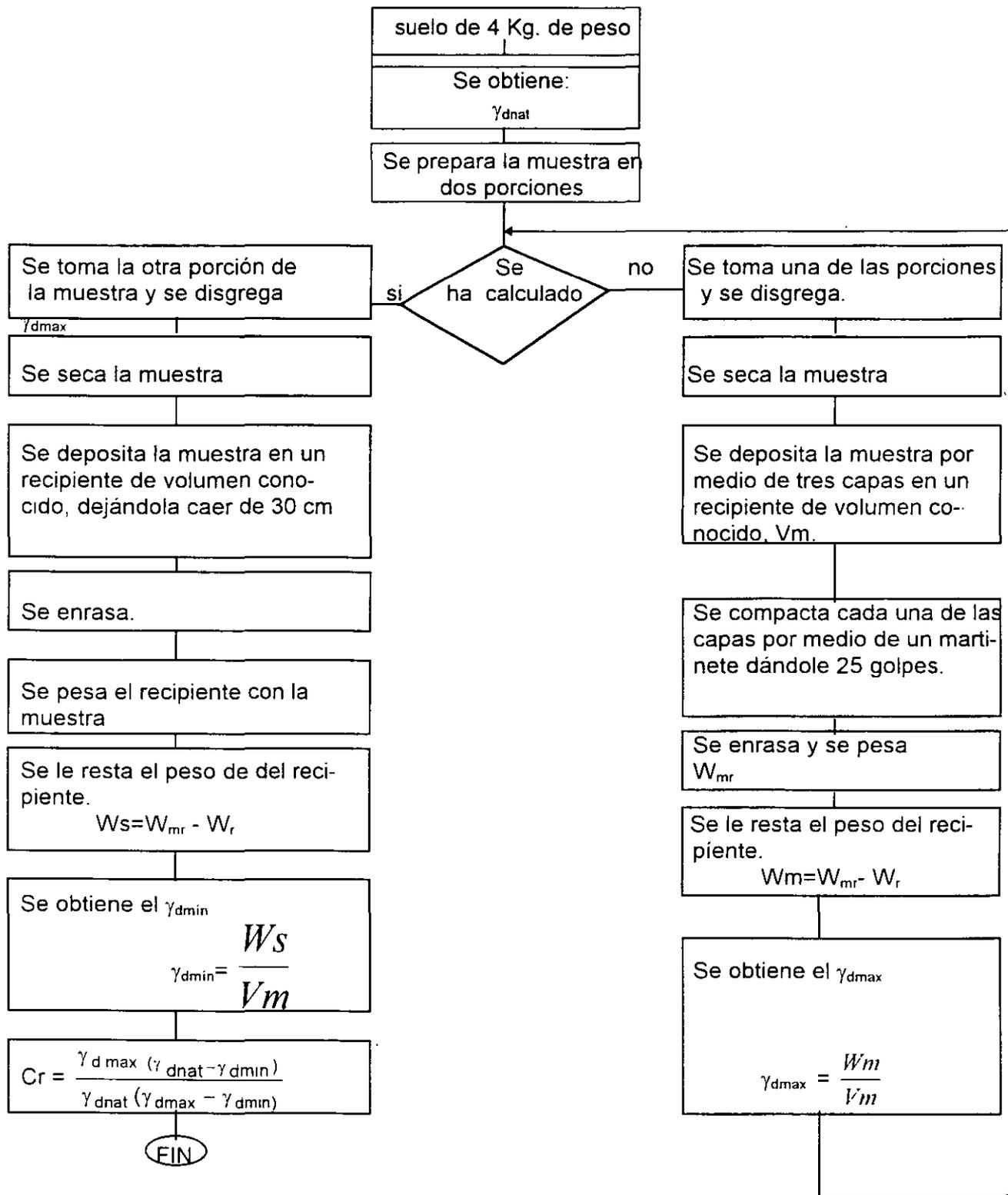
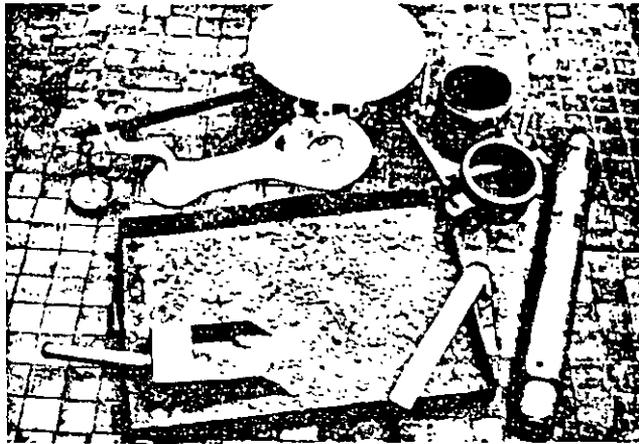


Fig. 6

COMPACIDAD RELATIVA



OBTENCION DE LA COMPACIDAD RELATIVA



1.- EQUIPO

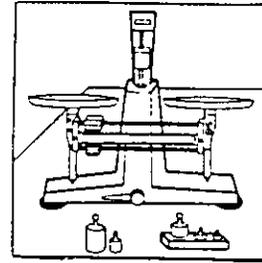
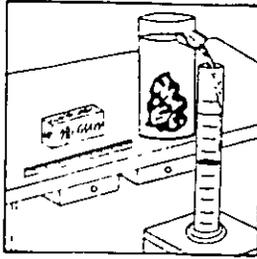
- a) Cucharón de lámina
- b) Recipiente metálico de 944 cm³
- c) Charola
- d) Enrasador
- e) Báscula de 20 Kg de capacidad y 0.1 gramo de aproximación.
- f) • Martinete de 2.48 kg de peso y una altura de caída libre de 30.5 cm.

PROCEDIMIENTO

- 1.- Se obtiene el volumen de la muestra del suelo donde se desea conocer la compacidad relativa, generalmente alrededor de 5 lts.

$$V_m$$

- 2.- La muestra obtenida se seca y se pesa, obteniendose W_s



- 3.- Se obtiene el peso volumétrico seco natural dividiendo el peso seco (W_s) entre el volumen de la muestra (V_m)

$$\gamma_{d_{nat}} = \frac{W_s}{V_m}$$

- 4.- Para la obtención del peso volumétrico seco mínimo ($\gamma_{d_{min}}$) la muestra seca se disgrega sin romper los granos del suelo y se deposita en el recipiente cilíndrico de volumen conocido (944 cm^3) por medio de un cucharón de lámina, dejándolo caer el suelo de 30 cm. de altura.



- 5.- Cuando el recipiente esté lleno con el suelo suelto se enrasa teniendo cuidado de no compactarlo y se pesa.

W_{sr}



- 6.- Al peso obtenido al pesar el recipiente junto con la muestra (W_{RS}) se le resta el peso del recipiente (W_R) y se tiene el peso de la muestra suelta seca (W_{Smin}).

$$W_{RS} - W_R = W_S$$

- 7.- Dividiendo el peso de la muestra suelta seca entre el volumen del recipiente, se obtiene el peso volumétrico seco mínimo.

$$\gamma_{dmin} = \frac{W_{Smin}}{V_T}$$

- 8.- El peso volumétrico seco máximo ($\gamma_{dmáx}$) se obtiene depositando la muestra en tres etapas iguales en el recipiente, compactando cada capa.
- 9.- Se deposita la primera capa y se le dan 25 golpes uniformemente repartidos por medio del martinete, con altura libre de caída de 30 cm.



10.- Se coloca el extensómetro y se repite el proceso para las otras dos capas.



11.- Terminada la compactación, se retira el extensómetro, se enrasa y se pesa el recipiente con la muestra.

W_{sr}



12.- Al peso del recipiente con la muestra (W_{sr}) se le resta el peso del recipiente (W_r) y se obtiene el peso de la muestra seca compactada.

W_{Smax}



- 13.- Ya obtenido el peso de la muestra seca W_s y conocido el volumen del recipiente V_m se obtiene el peso volumétrico seco máximo.

$$\gamma_{dmax} = \frac{W_{Smax}}{V_m}$$

- 14.- Compacidad Relativa. \rightarrow

$$C_R = \frac{\gamma_{dmax} (\gamma_{dnat} - \gamma_{dmin})}{\gamma_{dnat} (\gamma_{dmax} - \gamma_{dmin})}$$

U N A M
 FACULTAD DE INGENIERIA
 INGENIERIA CIVIL
 GEOTECNIA

COMPACIDAD RELATIVA

OBRA : _____

FECHA : _____

UBICACION : _____

OPERADOR : _____

| Muestra Nº | Volumen de la muestra Vm | Peso de la muestra Wm | $\gamma_{dnat} = \frac{Wm}{Vm}$ | Volumen del Recipiente Vm | Peso del Recipiente Wr | Peso del recipiente + peso del suelo Comp. Ws | Peso del suelo Seco Ws | $\gamma_{dmax} = \frac{Ws}{Vr}$ | Peso del Recipiente + peso del suelo Suelto Ws | Peso del Suelo Seco. Ws | $\gamma_{dmin} = \frac{Ws}{Vr}$ | Cr |
|---------------|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|----------------------------------|--|-------------------------------------|---------------------------------|---|--------------------------------------|---------------------------------|----|
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

$$C_r = \frac{\gamma_{dmax}(\gamma_{dnat} - \gamma_{dmin})}{\gamma_{dnat}(\gamma_{dmax} - \gamma_{dmin})}$$

DURANTE LA OBTENCION DE LA COMPACIDAD RELATIVA SE PUEDEN COMETER LOS SIGUIENTES ERRORES.

- 1.- Al medir el volumen de la muestra.
- 2.- No enrasar correctamente la muestra.
- 3.- Obtener malas pesadas.

Da4. GRADO DE SATURACION

El grado de saturación (G_w) mide el porcentaje de los vacíos del suelo que están llenos de agua.

$$G_w = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

$$G_w = \begin{cases} 0\% = \text{Suelo seco} \\ 0 < G_w < 100\% = \text{Parcialmente saturado} \\ 100\% = \text{Saturado} \end{cases}$$

Los valores más bajos del grado de saturación que se encuentran en el planeta tierra se obtienen en arenas secas donde se puede determinar G_w del orden de 2.0 %. Los suelos saturados donde $G_w = 100\%$ ocurren generalmente abajo del nivel freático y en zonas en que por capilaridad asciende el agua hasta saturar el suelo.

Debe tenerse presente que hay aire y gases disueltos en el agua por lo que tampoco se presenta rigurosamente el valor de 100 %.

El grado de saturación es significativo en el comportamiento mecánico de los suelos; en arenas intuitivamente se puede comprender este hecho observando las playas, en la que se presenta una zona de arenas parcialmente saturadas donde se puede caminar, pueden incluso transitar vehículos; gracias a la alta resistencia al corte originada por la tensión capilar en los meniscos que se forman en ella, resistencia que se pierde al secarse o saturarse la arena porque desaparecen los meniscos.

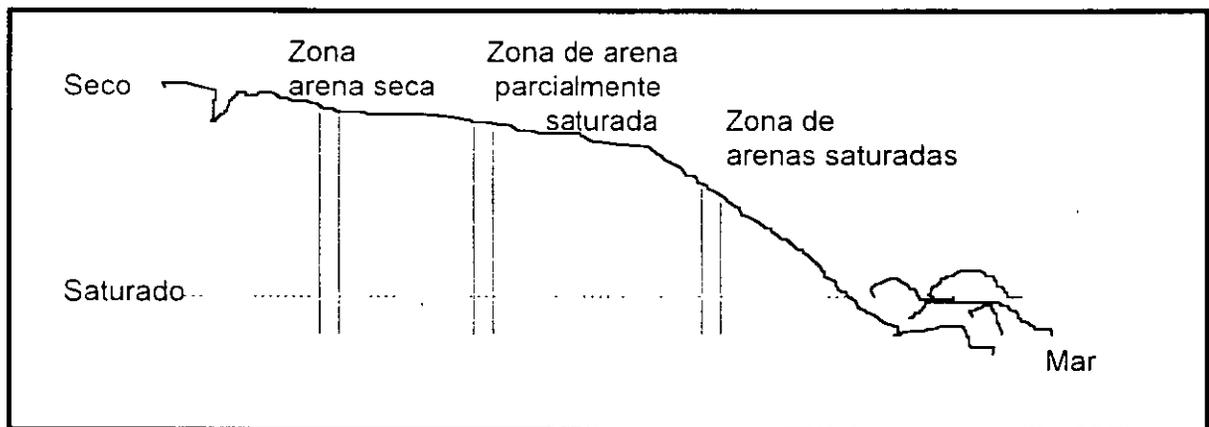


Fig. 7

En arcillas el grado de saturación es generalmente alto, excepto en zonas desérticas y sobre todo en la costa superficial del estrato.

Algunas arcillas con grado de saturación del 90 %, al tacto parecen que son secos porque adquieren una resistencia a la compresión muy alta.

En los depósitos de arcillas saturadas siempre queda aire atrapado y la descomposición de materia orgánica genera gases, esto hace que el grado de saturación sea menor que 100 %, lo cual se puede comprobar al obtener muestras inalteradas donde se generan expansiones por el cambio de esfuerzos que sufren al extraerse, expansiones que originan cambios de volumen, aumento de la relación de vacíos y disminución del grado de saturación, este fenómeno se puede observar, de manera cualitativa con una botella de gaseosa, antes de destaparla tiene un volumen aparente, después de destaparla aumenta de volumen y al dejar que se libere el gas disuelto el volumen disminuye sensiblemente, la variación se debe a los cambios de volumen en los gases originados por el cambio de presión en la botella

En la siguiente tabla se clasifican los suelos granulares en función del grado de saturación.

| Grado de saturación | Estado del suelo |
|---------------------|--------------------|
| 0 | Seco |
| 1 - 25 | Ligeramente húmedo |
| 25 - 50 | Húmedo |
| 50 - 75 | Muy húmedo |
| 75 - 99 | Mojado |
| 100 | Saturado |

Tabla 3

Obtención del grado de saturación.

Para la obtención del grado de saturación es necesario conocer el volumen de agua que se encuentra en una muestra dada y el volumen de vacíos de la misma muestra; primeramente se obtiene el volumen de la muestra (V_m) y el peso de la muestra (W_m) y para la obtención del volumen del agua es necesario conocer el peso del agua contenido en la muestra (W_w), el que se calcula de la diferencia del peso total de la muestra (W_t) y el peso de los sólidos de ella (W_s) obteniendo al secarla a 100°C durante 24 horas.

$$W_w = W_t - W_s$$

Esta diferencia dividida entre el peso volumétrico del agua ($\gamma_w = 1$) se obtiene el volumen del agua contenido en la muestra de suelo (V_w).

$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w}$$

Esta diferencia dividida entre el peso volumétrico del agua ($\gamma_w = 1$) se obtiene el volumen del agua contenido en la muestra del suelo (V_w).

$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w}$$

El volumen de vacíos (V_v) se obtiene de la diferencia del volumen de la muestra (V_m) y el volumen de sólidos (V_s), obtenido de dividir el peso de los sólidos entre el peso volumétrico de los sólidos (γ_s).

$$V_s = \frac{W_s}{\gamma_s}$$

$$V_v = V_t - V_s$$

$$G_w = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

GRADO DE SATURACION

Se obtiene el volumen total de la muestra de suelo (V_t) y se obtiene su peso (W_t).

Se seca la muestra al horno a 100°C durante 24 horas.

Se pesa la muestra seca (W_s).

Se obtiene el peso del agua en la muestra de la diferencia

$$W_w = W_t - W_s$$

Se obtiene el volumen del agua.

$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w}$$

γ_w = Peso volumétrico del agua = 1

Se obtiene el volumen de los sólidos

$$V_s = \frac{W_s}{\gamma_s}$$

γ_s = Peso volumétrico de los sólidos

Se obtiene el volumen de vacíos restando al volumen total, el volumen de sólidos.

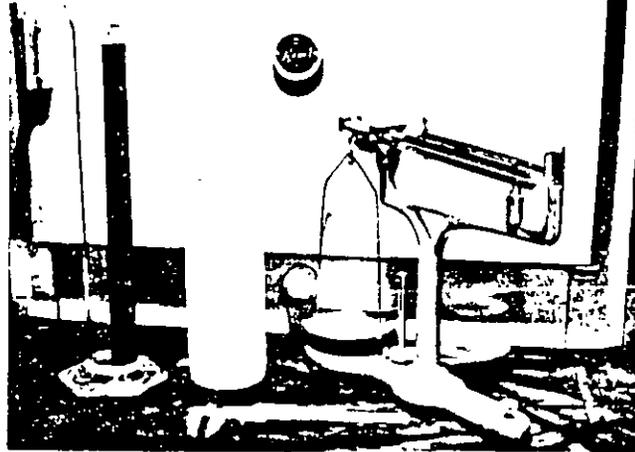
$$V_v = V_t - V_s$$

Se obtiene el grado de saturación.

$$G_w = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100$$

FIN

OBTENCION DEL GRADO DE SATURACION

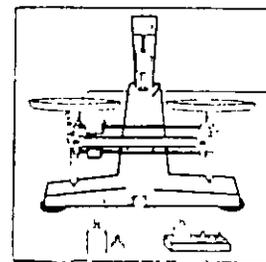
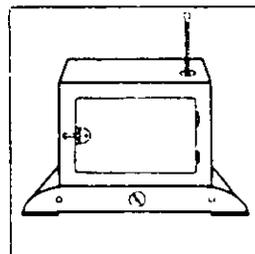
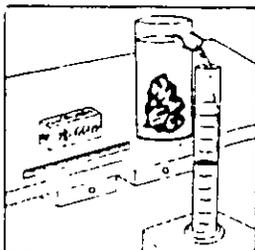


1.- EQUIPO EMPLEADO

- a). Horno de secado
- b). Balanza de precisión
- c). Recipiente con mercurio
- d). Regla para medir o un Vernier
- e). Probeta graduada

PROCEDIMIENTO:

- 1.- Obtener el volumen (V_m) y peso de la muestra (W_m), midiéndola o por inmersión en mercurio (Hg).
- 2.- Secar la muestra al horno a 100°C durante 24 horas.
- 3.- Pesar la muestra seca W_s .



4.- El peso del agua (W_w) se obtiene de

$$W_m - W_s = W_w$$

5.- El volumen del agua se determina:

$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w}$$

$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w}$$

γ_w = Peso volumétrico del agua = 1 gr / cm³

6 - El volumen de la muestra seca del suelo, se obtiene de:

$$V_s = \frac{W_s}{\gamma_s}$$

$$V_s = \frac{W_s}{\gamma_s}$$

γ_s = Peso volumétrico de los sólidos

- 7.- El volumen de vacíos (V_v) se determina restando del volumen total (V_t), el volumen de los sólidos (V_s).

$$V_v = V_t - V_s$$

$$V_t - V_s = V_v$$

- 8.- se obtiene el grado de saturación.

$$G_w \% = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100$$

$$G_w = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

U N A M
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL
GEOTECNIA

GRADO DE SATURACION

| | |
|--|--|
| OBRA: _____ LOCALIZACION: _____ SONDEO No. _____ ENSAYE _____ MUESTRA: _____ PROF _____ DESCRIPCION: _____ | FECHA : _____ OPERADOR: _____ _____ CALCULO: _____ _____ |
| | |

| Volumen total V_T | Peso total W_T | Peso de muestra seca W_S | Peso del agua en la muestra $W_W = W_T - W_S$ | Volumen del agua en la muestra $\frac{W_W}{\gamma_w}$ $V_W = \frac{W_W}{\gamma_w}$ | Volumen de los sólidos $\frac{W_S}{\gamma_s}$ $V_S = \frac{W_S}{\gamma_s}$ | Volumen de vacíos $V_V = V_T - V_S$ | Grado de saturación $G_w = \frac{V_W}{V_V} \times 100$ |
|------------------------|---------------------|-------------------------------|--|--|--|--|---|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

ACLARACIONES: _____

OBSERVACIONES: _____

Registro 3

DURANTE LA OBTENCION DEL GRADO DE SATURACION SE PUEDEN COMETER LOS SIGUIENTES ERRORES

- 1.- En la obtención del volumen total de la muestra.
- 2.- No tener la muestra el tiempo suficiente en el horno a la temperatura adecuada.
- 3.- Obtener malas pesadas.

IIDa5. CONTENIDO DE AGUA

Se define como contenido de agua del suelo la relación entre el peso del agua contenida en una muestra de él y el peso de los sólidos del suelo de la misma.- Este último peso se obtiene al secar el espécimen a 100°C durante 24 horas.

Esta temperatura se ha fijado para normar la cantidad de agua que debe extraerse del suelo, pero no significa que el agua así medida sea toda la que se encuentra en el material. En la masa del suelo se pueden presentar diferentes calidades o estados de agua, no toda el agua en el interior del material se comporta de la misma forma y pueden señalarse:

- | | | |
|-----|---|--|
| 1 | <u>Agua higroscópica o superficial.</u> | Se define como la que pierde el suelo cuando se ha secado a la temperatura ambiente. |
| 2 - | <u>Agua capilar</u> | Es la detenida en el suelo por fenómenos capilares y está sujeta a presiones negativas. |
| 3.- | <u>Agua gravitacional</u> | Es la que se comporta de la misma forma que el agua en los ríos, lagos y mares, y está sujeta a presiones positivas, generalmente debido a su propio peso o de esa magnitud. |

4.- Agua adsorbida o sólida.

Es la que se acomoda en el entorno de las partículas minerales formando una capa alrededor de las moléculas del suelo; está sujeta a presiones que aumentan a medida que se llega al lindero de las moléculas del sólido. Esta agua se encuentra sujeta a presiones sumamente altas (2000 Kg /cm²)¹ y se comporta en forma completamente diferente al agua libre.

El contenido de agua es una de las relaciones gravimétricas de los suelos de más fácil obtención y se expresa en porciento de la forma siguiente:

$$W \% = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

donde:

W = Contenido de agua

W_w = Peso del agua

W_s = Peso del suelo seco

Este parámetro permite prever el posible comportamiento mecánico del suelo en forma cualitativa, es decir, estimar aproximadamente la resistencia al corte y la deformabilidad del material.

Intuitivamente es evidente y se puede comprobar en el laboratorio, que no se comporta igual un material con alto contenido de agua que el mismo con bajo contenido de agua. No se comporta lo mismo una arcilla con contenido de agua de 50 % y saturada, que otra con un contenido de agua de 200 % también saturada; la arcilla con el alto contenido en estado natural es más compresible, menos resistente al esfuerzo cortante que la de contenido de agua bajo.

Lo anterior no significa que se conozcan los valores de los parámetros de las propiedades mecánicas de los suelos, solamente se establece una relación cualitativa de su posible comportamiento en función del contenido de agua.

¹* G:P Tschebotarioff, in Soil Mechanics, Foundation and Earth Structures, cita a Winterkom H.F ., in Soil Science Agosto 1943. pág. 101-105

Valores aproximados del contenido de agua para diferentes muestras de suelo

| | |
|--------------------------------|-------------|
| Arena densa saturada | 20 % |
| Arcilla glacial saturada | 40 % |
| Arcilla bentonítica | 200 % |
| Arcilla de la ciudad de México | 300 - 500 % |
| Arcilla altamente compresible | 1000 % |

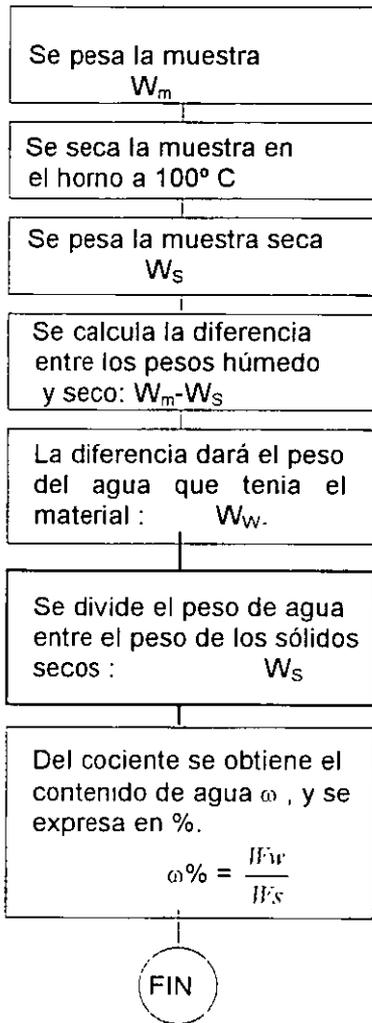
Tabla 4

Obtención del contenido de agua

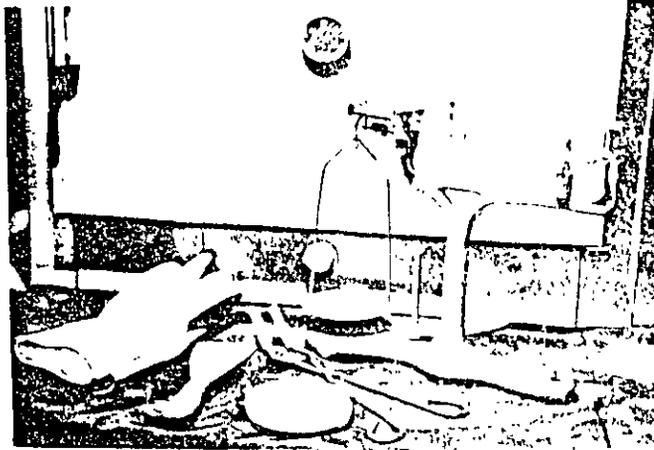
Consiste en obtener el peso del agua que contiene la muestra de suelo (W_w) y el peso del material sólido de la misma muestra (W_s), para la determinación del peso del agua se toman aproximadamente 60 gramos de muestra y se pesa (W_T), obteniéndose el peso total que es igual al peso del agua más el peso de los sólidos que se encuentra en la muestra ($W_T = W_w + W_s$), posteriormente se seca al horno a una temperatura de 100°C durante 24 horas, se pesa obteniéndose el peso de los sólidos (W_s), al peso total se le resta el peso de los sólidos ($W_T - W_s$) que es igual al peso del agua (W_w), dividiendo el peso del agua entre el peso de los sólidos se obtiene el contenido de agua.

$$W \% = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

CONTENIDO DE AGUA



OBTENCION DEL CONTENIDO DE AGUA

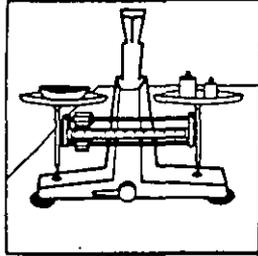


1.- EQUIPO

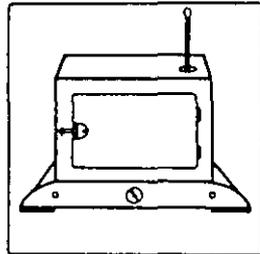
- a) Vidrio de reloj o refractario.
- b) Balanza de precisión con error de 0.1gramos.
- c) horno de secado a temperatura constante a 110°C.
- d) Pinzas, guantes, espátula.

PROCEDIMIENTO

- 1.- se coloca la muestra del suelo en una cápsula y se pesa W_{ch} (peso de cápsula + suelo húmedo).



- 2.- Se coloca la muestra en el horno durante 24 horas a 100°C



- 3.- Se pesa la muestra seca W_{cs} (peso de cápsula + suelo seco).

$$W_C + W_S = W_{CS}$$

4.- La diferencia entre el peso cápsula + suelo húmedo, menos el peso cápsula + suelo seco, dará el peso del agua que originalmente tenía el material.

$$W_H - W_S = W_w$$

5.- Al peso de la cápsula + suelo seco se le resta el peso de la cápsula y se obtiene el peso del suelo seco.

$$W_S = W_{CS} - W_C$$

6.- Se divide el peso del agua entre el peso seco y se obtiene el contenido del agua.

$$W_{\%} = \frac{W_w}{W_S} 100$$

U N A M
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL
GEOTECNIA

CONTENIDO DE AGUA

| | |
|---|--|
| OBRA: _____ LOCALIZACION: _____ SONDEO No: _____ ENSAYE No: _____ MUESTRA No: _____ PROF. _____ DESCRIPCION: _____ _____ | FECHA: _____ OPERADOR: _____ _____ CALCULO: _____ _____ _____ |
|---|--|

| PRUEBA No | CAPSULA No | Peso cápsula + suelo húmedo | Peso cápsula + suelo seco | Peso del agua | Peso de la cápsula | Peso del suelo seco | Contenido de agua |
|--------------|---------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| | | Wch gr | Wcs gr | Ww gr | Wc gr | Ws gr | W% % |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

ACLARACIONES: _____
 OBSERVACIONES: _____

DURANTE LA OBTENCION DEL CONTENIDO DE AGUA SE PUEDEN COMETER LOS SIGUIENTES ERRORES.

- 1.- Al nivelar la báscula antes de las pesadas.
- 2.- Realizar malas pesadas.
- 3.- No tener las muestras en el horno el tiempo suficiente y a la temperatura adecuada.
- 4.- Alteraciones que puede sufrir la muestra por medio ambiente o por la falta de cuidado en la conservación de la muestra.

IID.b RELACIONES ADIMENSIONALES ENTRE PESOS Y VOLUMENES

IIDb1. Pesos volumétricos

El peso volumétrico de una muestra de suelo se define como la relación entre el peso de la muestra del suelo y el volumen de ella.

Se obtiene con la siguiente relación:

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m}$$

El peso de la muestra (W_m) es igual al peso de los sólidos y del agua intersticial

$$W_m = W_s + W_w$$

El volumen (V_m), según el peso volumétrico de que se trate, así:

1.- El peso volumétrico de los sólidos es:

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

y si el suelo esta seco:

$$\begin{array}{l} W_w = 0 \\ W_s = W_m \\ V_m = V_s \end{array} \longrightarrow \gamma_m = \gamma_d = \gamma_s$$

$$\gamma_d = \text{Peso volumétrico del material seco} = \frac{W_s}{V_m}$$

$$\begin{array}{ccc} \frac{W_m}{V_m} = \frac{W_s}{V_m} = \frac{W_s}{V_s} \\ \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \\ \gamma_m = \gamma_d = \gamma_s \end{array}$$

2.- Si el suelo está húmedo

$$\gamma_m = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v} = \frac{\gamma_s + \frac{W_w}{V_s}}{\frac{V_s}{V_s} + \frac{V_v}{V_s}} = \frac{\gamma_s + \frac{W_w}{W_s} \gamma_s}{1 + e} = \gamma_s \frac{1 + w}{1 + e}$$

También:

$$\gamma_m = \frac{V_s \gamma_s + V_w \gamma_w}{V_s + V_v} = \frac{\frac{\gamma_s}{e} + G_w \gamma_w}{\frac{1}{e} + 1} = \frac{\gamma_s + e G_w \gamma_w}{1 + e}$$

$$\gamma_m = \frac{S_s + e G_w}{1 + e} \gamma_w$$

3.- Si el suelo está saturado

$$W_w = \text{máxima} \quad \text{y} \quad \gamma_m = \gamma_{sat} = \gamma_s \quad V_w = V_v$$

$$\gamma_{SAT} = \frac{W_s + W_w}{V_m} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v} = \frac{\gamma_s + \frac{V_v w}{V_s}}{1 + e}$$

$$= \frac{\gamma_s + \gamma_w e}{1 + e} = \gamma_w \frac{S_s + e}{1 + e}$$

4.- Cuando el suelo se encuentra debajo del nivel de aguas freáticas se presenta el fenómeno de flotación, el peso volumétrico se define como :

$$\text{Peso volumétrico sumergido: } = \gamma'_m = \gamma_m - \gamma_0$$

$$\gamma_0 = \gamma_w$$

$$\text{Tomando } \gamma_0 = 1.0 \text{ T/m}^3, \gamma'_m - 1$$

$$\gamma'_s = Ss\gamma_0 - \gamma_0 = \gamma_0(Ss - 1)$$

$$\gamma'_d = \left(\frac{Ss}{1+e} - 1 \right) \gamma_0 = \left(\frac{Ss - 1 - e}{1+e} \right) \gamma_0$$

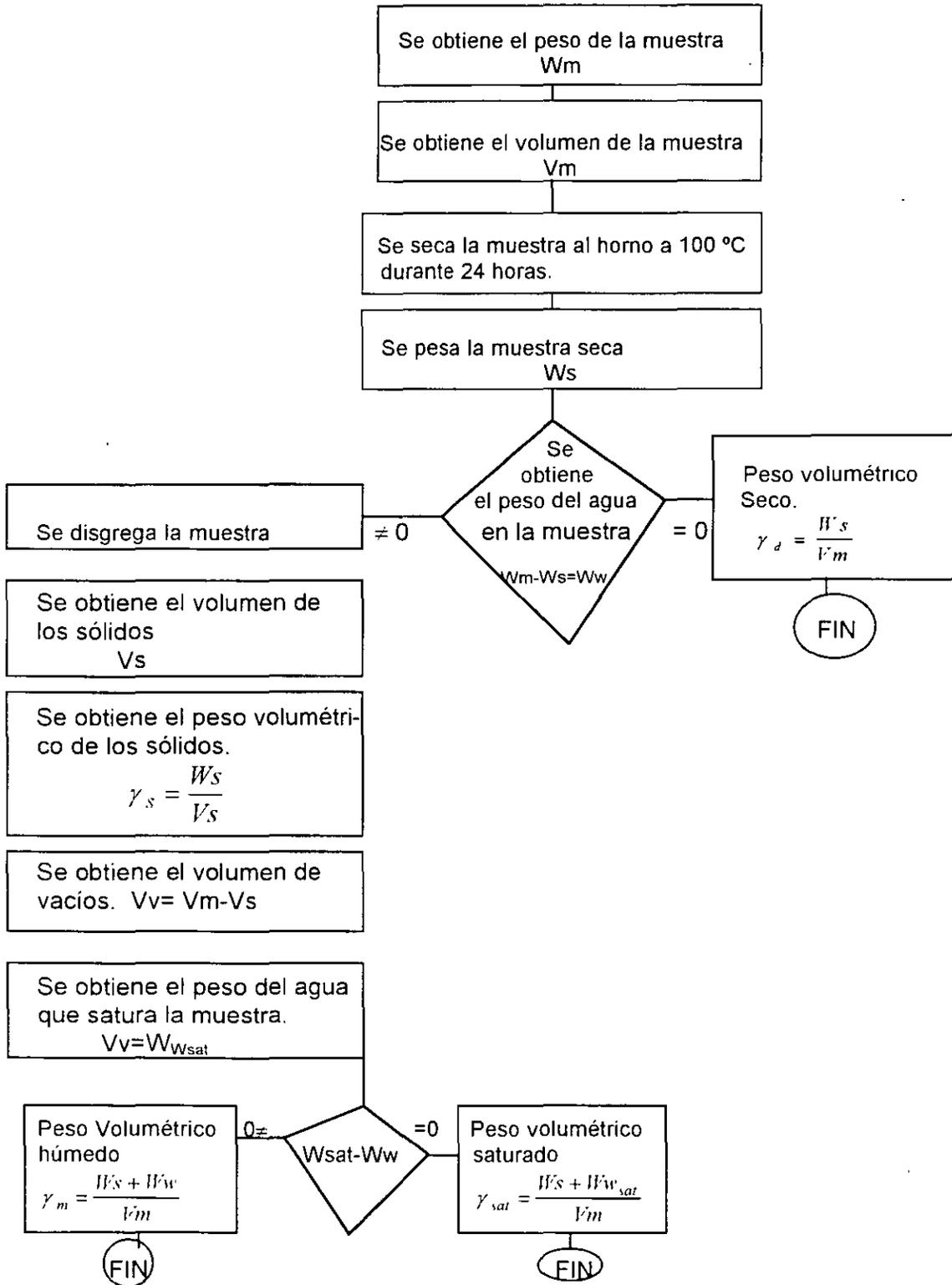
$$\gamma'_m = \frac{\gamma_s + Ww\gamma_s - \gamma_0 - e\gamma_0}{1+e} = \frac{\gamma_s + W\gamma_s - e\gamma_0}{1+e}$$

$$= \frac{Ss\gamma_0 - \gamma_0 + w\gamma_s - e\gamma_0}{1+e} = \frac{(Ss - 1 - e)}{1+e} \gamma_0 + \frac{W\gamma_s}{1+e}$$

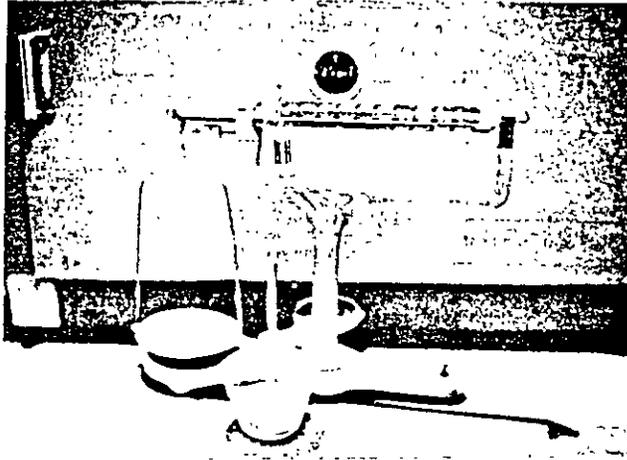
RESUMEN

| Estado del suelo | Peso volumétrico | En función de las propiedades volumétricas y gravimétricas |
|-----------------------|--|---|
| Sólidos únicamente | $\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$ | $\gamma_s = S_s \gamma_0$ |
| Seco ($G_w = 0$) | $\gamma_d = \frac{W_s}{V_m}$ | $\gamma_d = \frac{S_s}{1+e} \gamma_0$ |
| Parcialmente saturado | | |
| $G_w = G_w$ | $\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} = \frac{W_s + W_w}{V_m}$ | $\gamma_m = \frac{S_s(1+w)}{1+e} \gamma_0$ $\gamma_m = \gamma_w \frac{S_s + eG_w}{1+e}$ |
| Saturado | | |
| $G_w = 1$ | $\gamma_{sat} = \frac{W_s + W_w}{V_m}$ | $\gamma_{sat} = \frac{S_s + e}{1+e} \gamma_0$ |
| Sumergido | | |
| Sólido | $\gamma'_s = \gamma_s - \gamma_w$ | $\gamma'_s = (S_s - 1) \gamma_0$ |
| Seco | $\gamma'_d = \gamma_d - \gamma_w$ | $\gamma'_d = \frac{S_s - 1 - e}{1+e} \gamma_w$ $\gamma'_m = \gamma'_d + \frac{w}{1+e} \gamma_w$ |
| Parcial saturado | $\gamma'_m = \gamma_m - \gamma_w$ | $\gamma'_m = \gamma'_d + \frac{e}{1+e} G_w \gamma_w$ |
| Saturado | $\gamma'_{sat} = \gamma_{sat} - \gamma_w$ | $\gamma'_{sat} = \frac{S_s - 1}{1+e} \gamma_w$ |

PESO VOLUMETRICO



OBTENCION DEL PESO VOLUMETRICO

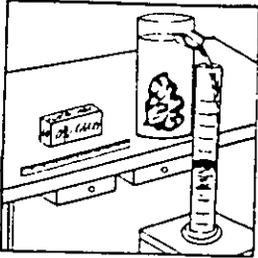


1.- EQUIPO

- a) Balanza de precisión.
- b) Horno de secado.
- c) Recipiente con mercurio.

PROCEDIMIENTO.

1.- De la muestra de suelo se obtiene el peso (W_m) y el volumen (V_m) por cualquier método:



- Haciendo una muestra cúbica y midiendo sus dimensiones.
- Sumergiendo la muestra en mercurio y por medio del mercurio desalojado se obtiene su volumen.

2.- Con los datos del paso anterior se puede obtener el peso volumétrico de la muestra de suelo.

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m}$$

3.- La muestra de suelo se coloca al horno durante 24 horas a 100°C



4.- Se saca la muestra del horno y se pesa, obteniéndose el peso de la muestra seca (W_s). Con la diferencia entre el peso de la muestra húmeda y el peso de la muestra seca se obtiene el peso del agua (W_w).

5.- Se obtiene:

- El peso volumétrico seco (γ_d)
- El peso volumétrico saturado (γ_{sat})
- El peso volumétrico sumergido (γ'_m), con el conocimiento del peso volumétrico del agua a 4°C y a la presión atmosférica.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{W_s + W_w}{V_t}$$

$$\gamma'_m = \gamma_m - \gamma_0$$

$$\gamma'_d = \gamma_d - \gamma_0$$

$$\gamma'_{sat} = \gamma_{sat} - \gamma_0$$

U N A M
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL
GEOTECNIA

PESOS VOLUMETRICOS

OBRA: _____
UBICACION: _____

FECHA: _____
OPERADOR: _____

| Peso de la muestra W_m | Volumen de la muestra V_m | Peso del suelo seco W_s | Peso del agua en la muestra W_w | Peso volumétrico seco $\gamma_d = W_s/V_m$ | Volumen de los sólidos $V_s = W_s/\gamma_s$ | Peso volumetrico de los sólidos $\gamma_s = W_s/V_s$ | Volumen de vacios $V_v = V_m - V_s$ | Peso del agua que satura la muestra W_{wsat} | Peso volumétrico humedo $\gamma_m = \frac{W_s + W_w}{V_m}$ | Peso volumétrico saturado $\gamma_{sat} = \frac{W_s + W_{wsat}}{V_m}$ | Muestra No |
|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|---|--|---|--|---|---|--|------------|
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |

Registro 5

DUARANTE LA OBTENCION DEL PESO VOLUMETRICO SE PUEDEN COMETER LOS SIGUIENTES ERRORES.

- 1 - En la obtención del volumen de la muestra y en la obtención del volumen de los sólidos.
- 2.- No tener la muestra el tiempo suficiente en el horno a la temperatura adecuada.
- 3.- Obtener malas pesadas.

IIDc. RELACIONES ADIMENSIONALES ENTRE PESOS Y VOLUMENES

IIDc1. Peso específico

El peso específico de cualquier sustancia se define como el peso volumétrico del material dividido entre el peso volumétrico del agua destilada a la presión atmosférica y a 4°C.

$$S_s = \frac{\gamma_{sólido}}{\gamma_{\text{agua a } 4^{\circ}\text{C}}}$$

El peso específico se requiere para calcular la relación de vacíos; se emplea en el análisis por medio del hidrómetro y para el cálculo de pesos volumétricos.

El peso específico se puede obtener a partir de la relación entre el peso de la sustancia y el peso del agua cuando se pesan volúmenes iguales.

$$S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s / V}{W_w / V} = \frac{W_s}{W_w}$$

Por definición la temperatura del agua afecta al peso específico ya que el peso volumétrico del agua cambia con la temperatura.

Determinación de peso específico S_s

El peso específico se obtiene determinando el volumen de un peso dado de granos de suelo y dividiéndolos entre el peso del mismo volumen de agua. el volumen de los granos se obtiene en un matraz de volumen conocido donde se sumergen los sólidos.

$$S_s = \frac{W_s}{W_{mw} + W_s - W_{mws}}$$

W_{mw} = Peso del matraz con agua hasta la marca de calibración.

W_s = Peso de la muestra seca del suelo cuyo peso específico se desea. _____

W_{mws} = Peso del matraz con el suelo y lleno de agua hasta la marca de calibración; a la temperatura de la prueba (es necesario tener la curva de calibración del matraz, la variación del peso con la temperatura).

$W_t = W_{mw} + W_s$ = Peso del matraz con agua hasta la marca de calibración más el peso del suelo. En este peso se incluye el volumen de agua igual al volumen del suelo.

W_{wd} = El peso del volumen de agua que desaloja el suelo, se obtiene restando de W_t el peso del matraz con suelo y lleno a la marca de calibración, así:

$$W_{wd} = W_t - W_s$$

sustituyendo el valor de W_t

$$W_{wd} = W_{mw} + W_{mws}$$

Dado que W_s es el peso del sólido que tiene igual volumen que el del agua desalojada de la definición de peso específico se tiene:

$$S_s = \frac{W_s}{W_{wd}}$$

$$S_s = \frac{W_s}{W_{mw} + W_s - W_{mws}}$$

El peso volumétrico del agua cambia con la temperatura, por lo cual es necesario relacionarlo con el peso volumétrico a la temperatura de 4°C, especificada como norma.

$$S_s = S_s K \quad \text{donde } K : \text{Corrección por temperatura}$$

$$K = \frac{\gamma_w}{\gamma_w \text{ a } 4^\circ\text{C}}$$

$$S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} K$$

Algunos valores del peso específico

| <u>Tipo de suelo</u> | <u>Peso específico</u> |
|-------------------------|------------------------|
| Arena | 2.65 - 2.67 |
| Arena limosa | 2.67 - 2.70 |
| Arcilla inorgánica | 2.60 - 2.80 |
| Suelo con mica o fierro | 2.75 - 3.00 |
| Suelo orgánico | < 2 |

Tabla 5

Para algunos materiales en los suelos el peso específico es :

| | |
|----------------|-------|
| Montmorilonita | 2.0 |
| Ilita | 2.60 |
| Cuarzo | 2.66 |
| Calcita | 2.72 |
| Clorita | 2.80 |
| Hematita | 5.30 |
| Mercurio | 13.60 |
| Plomo | 11.30 |
| Fierro | 7.80 |
| Agua | 1.00 |
| Hielo | 0.92 |

Tabla 6

PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS

Se tiene un matraz graduado y calibrado para las diferentes temperaturas.

Se toma 50 gr. aproximadamente de material que pasó la malla No 4.

Se pone alrededor de 300 Cl. de agua en el matraz calibrado y se vacía en él el material.

Se aplica vacío al matraz para extraer el aire disuelto, se aumenta la temperatura para aligerar el proceso

Se le añade agua hasta 2 cm. abajo de la marca de aforo.

Se agita el matraz y se obtiene la temperatura media para tres diferentes puntos y se obtiene temperatura media

Se agrega agua hasta la marca de aforo y se limpia el cuello y el exterior del matraz.

Se pesa el matraz con agua y suelo obteniéndose W_{mws}

Se obtiene el peso del matraz con agua de la curva de calibración con la temperatura media determinada W_{mw}

Se vierte el contenido del matraz en una cápsula de porcelana de peso conocido

Se seca al horno durante 24 horas a 100°C y se pesa, obteniéndose el peso de los sólidos W_s

Se obtiene el peso específico

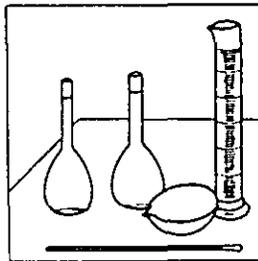
$$S_s = \frac{W_s}{W_s + W_{mw} + W_{mws}}$$

FIN

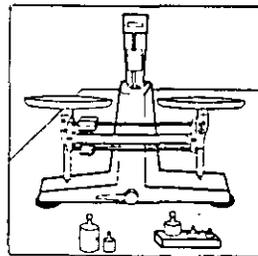
OBTENCION DEL PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS EN SUELOS FINOS

1.- EQUIPO

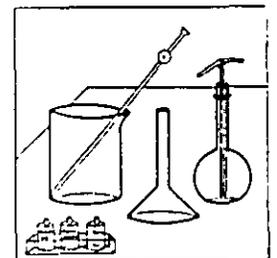
- a) Matracas calibrados con marca de aforo y 500 cm³ de capacidad.
- b) Termómetro graduado de 0°C a 50°C, con 0.1°C de precisión.
- c) Cápsula de porcelana o vidrio refractario.
- d) Probeta graduada a 500 cm³ de capacidad.



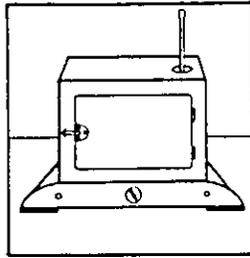
- e) Balanza con capacidad de 800 gr y precisión de 0.1 gr.



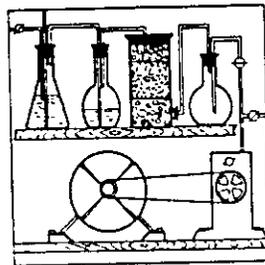
- f) Vaso de precipitado de 400 cm³ de capacidad.
- g) Embudo de vidrio de conducto largo.
- h) Piseta y pipeta de 5 cm³.
- i) Solución para disolver grasas: mezcla crónica.
- j) Alcohol del 96°.
- k) Agua destilada.



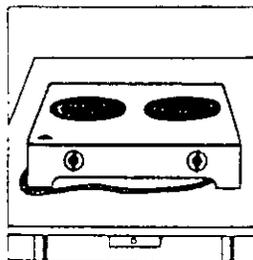
l) Horno de secado a temperatura constante de 100°C.



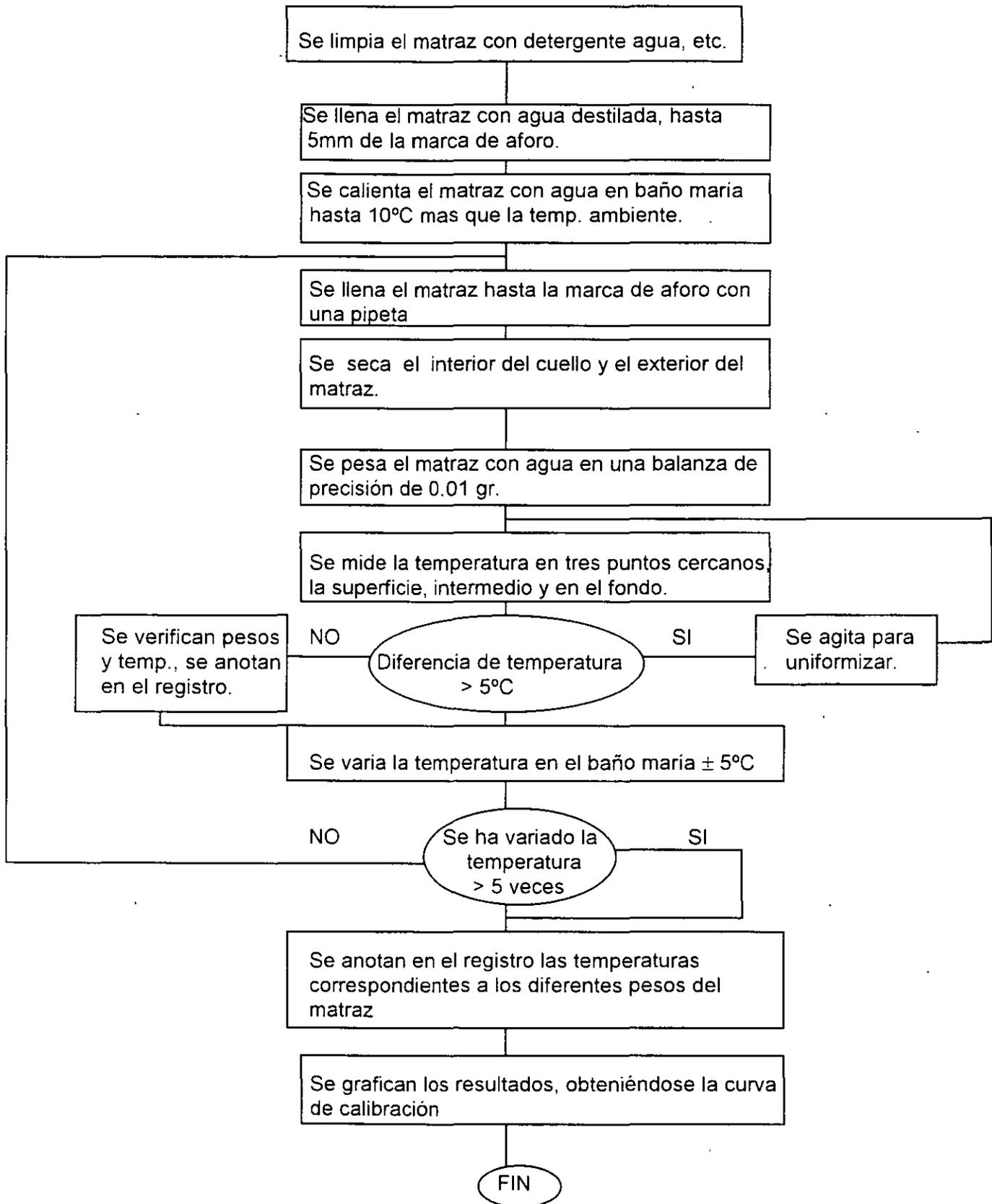
m) Sistema de vacío: bomba mecánica con trampa de agua.



n) Estufa de parrilla.

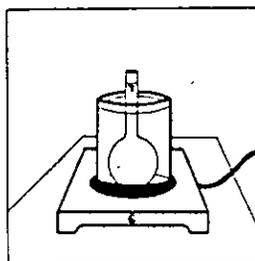


CALIBRACION DEL MATRAZ

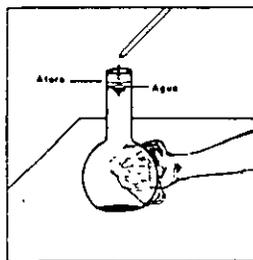


CALIBRACION DELMATRAZ AFORADO

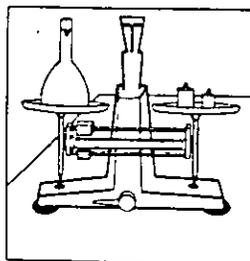
- 1.- Se limpia el matraz empleando detergentes, agua y otros solventes: de grasas, alcohol, acetona, éter, etc.



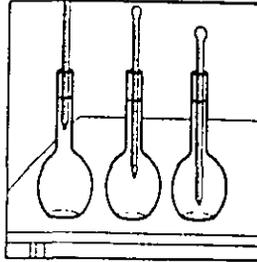
- 2.- Se llena el matraz con agua destilada hasta aproximadamente 5 mm debajo de la marca de aforo, se calienta en baño María hasta unos 10°C, más que la temperatura ambiente.
- 3.- Se llena el matraz, utilizando una pipeta, hasta que la parte superior del menisco coincida con la marca de aforo.
- 4.- Se seca el interior del cuello y el exterior del matraz procurando que el agua no baje de la marca de calibración.



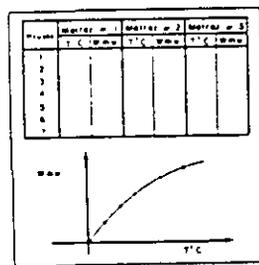
- 5.- Se pesa el matraz con agua con una precisión de 0.01 gr. para obtener (W_{mW})



- 6.- Se mide la temperatura en tres puntos (cerca de la superficie, al centro y cerca del fondo). Si las diferencias exceden de 0.5°C se vuelve a agitar para uniformizar.



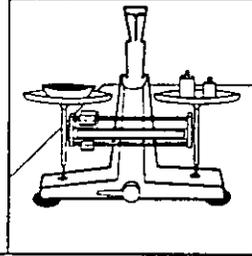
- 7.- Se hace una determinación adicional del peso y la temperatura para verificar resultados y se anotan en el registro.
- 8.- Se repiten los pasos 2 a 7 utilizando agua a una temperatura diferente a la medida en el paso 6 ($\pm 5^{\circ}\text{C}$).
- 9.- Se repite el paso 8 varias veces para obtener el numero de datos deseado (en general bastan 6 ó 7 puntos).
- 10.- Las temperaturas y los pesos del matraz con agua, se anotan en el registro de "calibración del matraz".
- 11.- Se construye la curva de calibración.



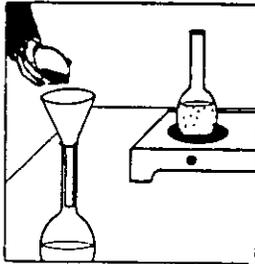
OBTENCION DEL PESO ESPECIFICO DE SOLIDOS

- 1.- Conviene realizar la prueba con el contenido de agua natural que tenga el suelo, obteniéndose el peso de la muestra seca al finalizar la prueba.

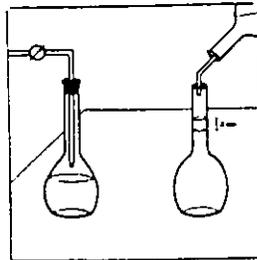
Pesar 500 gr del material que ha pasado la malla No. 4 en una cápsula.



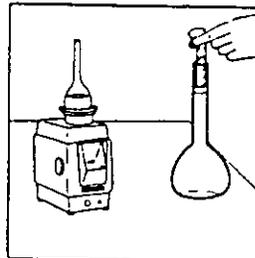
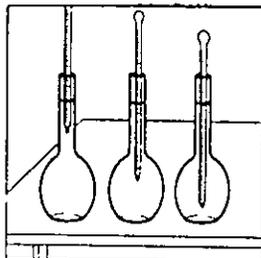
- 2.- Poner alrededor de 300 cl de agua en el matraz.
- 3.- Vaciar todo el material seco de la cápsula en el matraz.
- 4.- Calentar el matraz.



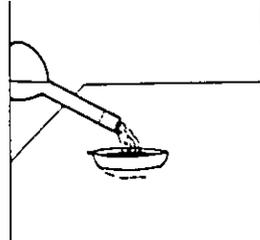
- 5.- Aplicar vacío al matraz para extraer el aire no disuelto.
- 6.- Agregar con cuidado agua destilada hasta 2 cm debajo de la marca de aforo.



- 7.- Agitar el matraz y medir la temperatura en el centro y en otros puntos de la suspensión.
- 8.- Agregar agua destilada hasta que la parte inferior del menisco coincida con la marca de calibración.



- 9.- Secar el interior del cuello del matraz.
- 10.- Pesar el matraz con suelo y agua, con precisión de 0.01 gr anotándolo en el renglón W_{mws} del registro.
- 11.- Verter el contenido del matraz en una cápsula y enjuagar el matraz para recuperar todo el material y poner la cápsula a secar 24 horas a 100°C .



- 12.- Obtener el peso de los sólidos por diferencias entre el peso de la cápsula con material (W_{cm}) y el peso de la cápsula limpia (W_c).

$$W_S = W_{cm} - W_c$$

- 13.- De la curva de calibración del matraz se obtiene W_{mw} .
- 14.- El peso específico de los sólidos se obtiene con la expresión para S_s donde:

$$S_s = \frac{W_s}{W_{mw} + W_s - W_{mws}}$$

$$K = \frac{\gamma_w}{\gamma_0} = \frac{\text{Peso.Vol.del.agua.a. } T^{\circ}\text{C}}{\text{Peso.Vol.del.agua.a. } 4^{\circ}\text{C}}$$

U N A M
 FACULTAD DE INGENIERIA
 INGENIERIA CIVIL
 GEOTECNIA

OBRA: _____
 UBICACION: _____
 SONDEO: _____

FECHA: _____
 OPERADOR: _____

PESOS ESPECIFICOS

| MUESTRA No | PROFUNDIDAD m | MATRAZ | TEM.(T) °C No | PESO MAT.+AGUA a T°C (Calibración) W_{mW} | PESO MAT. + AGUA+SUELO a T°C (Calibración) W_{mWS} | PESO SECO W_s | VOLUMEN DE SOLIDOS. $V_s = W_{wo} =$ $W_{mW} + W_s - W_{mWS}$ | PESO ESPECIFICO S_s (a temp. de la prueba) |
|---------------|------------------|--------|------------------|---|--|--------------------|--|---|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

ERRORES POSIBLES QUE SE PUEDEN COMETER EN LA REALIZACION DE LA PRUEBA PARA LA OBTENCION DE LOS PESOS ESPECIFICOS.

- 1.- Remoción incompleta del aire no disuelto.
- 2.- Secado defectuoso del interior del cuello o del exterior del matraz.
- 3.- Mala precisión en las pesadas.
- 4.- Mal llenado hasta la marca de aforo.
- 5.- Temperatura no uniformizada.
- 6.- Pérdidas de material durante la prueba.
- 7.- Mala limpieza del matraz.
- 8.- Empleo de agua con sólidos sueltos.

PESO ESPECIFICO DE LAS GRAVAS

Se sumergen las gravas en agua durante 24 horas y se mide el volumen de absorción.
 V_a

Se extraen , se secan superficialmente y se pesan.
 W_{sh} = peso de las gravas saturadas o húmedas.

Se introducen en una probeta graduada llena de agua; la diferencia de lecturas mide el volumen de las gravas.
 V_d

Se introducen las gravas al horno durante 24 horas a 100°C, se extraen se pesan y se obtiene el peso de la grava seca
 W_{sg}

Se obtiene el porcentaje de absorción de la cantidad de agua absorbida y el peso seco

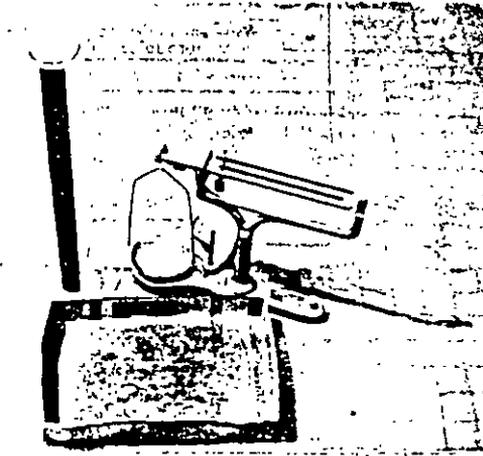
$$W\% = \frac{W_{sh} - W_{sg}}{W_{sg}}$$

Se obtiene el peso especifico de las gravas.

$$S_g = \frac{W_{sg}}{V_d - V_a}$$

FIN

OBTENCION DEL PESO ESPECIFICO DE LAS GRAVAS

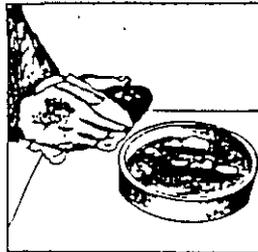


1.- EQUIPO

- a) Charola.
- b) Probeta graduada.
- c) Balanza con precisión de 0.1 gr.

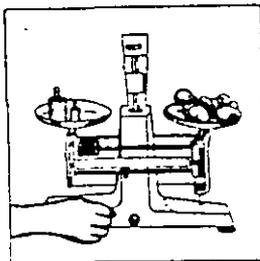
OBTENCION DEL PESO ESPECIFICO DE LA GRAVAS

- 1.- Se sumergen las gravas en agua durante 24 horas para que se saturen; se sacan del agua y se secan superficialmente.

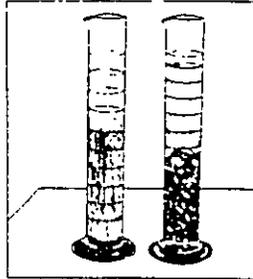


- 2.- Se pesan las gravas saturadas y secadas superficialmente en las balanzas de precisión y se anotan en el registro como:

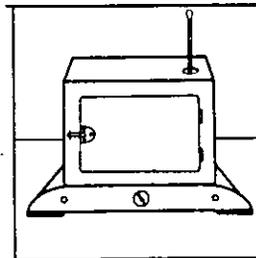
" Peso grava húmeda "



- 3.- Se determina el volumen de las gravas, introduciéndolas en una probeta graduada que contenga un volumen conocido de agua, la diferencia en la lectura, será el volumen de las gravas.



- 4.- Se secan las gravas en un horno durante 24 horas y se pesan anotando en el renglón "Peso grava seca".



- 5.- Se determina el porcentaje de absorción de la relación entre la cantidad de agua absorbida y el peso seco.

$$\% \text{ abs} = \frac{W_{gh} - W_{gs}}{W_{gs}} 100$$

W_{gh} = peso grava humeda
 W_{gs} = peço grava seca

- 6 - El peso específico de los sólidos se obtiene a partir de la relación del peso de las gravas secas entre la diferencia del volumen desalojado menos el volumen de absorción.

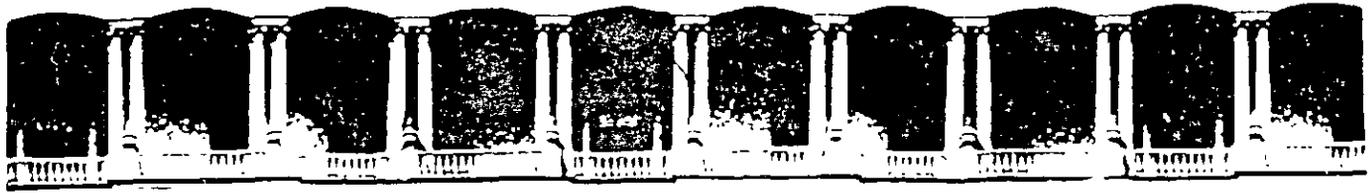
$$S_s = \frac{W_{gs}}{V_d - V_w}$$

V_d = Volumen desalojado

V_w = Volumen de Absorción

$$V_w = \frac{W_{gs} \%abs}{\gamma_w 100}$$

| | |
|--------|--------------------------------|
| III. | CLASIFICACION |
| IIIa. | Granulometria |
| IIIa.1 | Análisis Mecánico |
| IIIa.2 | Análisis Hidrométrico |
| IIIb. | <u>Limites de consistencia</u> |
| IIIb.1 | Límite Líquido |
| IIIb.2 | Límite Plástico |
| IIIb.3 | Límite de Contracción |
| IIIc. | <u>Clasificación de suelos</u> |



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS I

TEMA

CONDUCTIVIDAD HIDRÚLICA DE LOS SUELOS

**CONFERENCISTA
DR. RIGOBERTO RIVERA CONSTANTINO
PALACIO DE MINERÍA
MAYO 2000**

V. DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DE LOS SUELOS

La determinación de la conductividad hidráulica de los suelos (permeabilidad) es fundamental en todos los problemas relacionados con el flujo de agua en dichos materiales

Existen varios métodos para determinar la permeabilidad de los suelos, los cuales se pueden clasificar en:

Métodos directos.

Llamados así ya que buscan como objetivo fundamental la determinación del coeficiente de permeabilidad, ellos son:

- Permeámetro de carga constante.
- Permeámetro de carga variable
- Prueba in situ.

Métodos indirectos.

El coeficiente de permeabilidad se obtiene como un subproducto de una prueba que primariamente persigue otro fin:

- Determinación a partir de la curva granulométrica.
- Determinación a partir de la prueba de consolidación.
- Determinación a partir de la prueba horizontal de capilaridad.

En estas notas solo se describirán los principios fundamentales de los permeámetros de carga constante y de carga variable, que se utilizaran.

- Permeámetro de carga constante.

Este dispositivo se utiliza principalmente en suelos relativamente permeables, tales como arenas limpias o mezclas de arena y grava.

La Fig. 5 1 muestra esquemáticamente el funcionamiento de un permeámetro de carga constante. De acuerdo con dicha figura, y aceptando como válida la ley de Darcy, el volumen de agua V que atraviesa la muestra de suelo en un tiempo t , una vez que se ha establecido el flujo, es igual a

$$V = k a y t \quad (5.1)$$

donde

K = coeficiente de permeabilidad

A = Sección transversal de la muestra de suelo

$i = h / L$. gradiente hidráulico medio: siendo h la carga hidráulica y L la longitud de la muestra.

De la ecuación (5.1) se puede obtener el coeficiente de permeabilidad, resultando:

$$k = \frac{VL}{hAt} \quad (5.2)$$

Con el objeto de obtener resultados consistentes es indispensable efectuar varias determinaciones del coeficiente de permeabilidad, una vez que se ha establecido el flujo, para llegar así al valor promedio más probable de dicho coeficiente.

Permeámetro de carga variable.

Este tipo de permeámetro se utiliza en suelos menos permeables que los mencionados en el caso del permeámetro de carga constante, pudiendo ser arenas finas y mezclas de arena, limo y aun algo de arcilla

La Fig. 5 2 muestra de manera esquemática el funcionamiento de un parámetro de carga variable. Con referencia a dicha figura, la cantidad de agua que atraviesa la muestra de suelo en un tiempo dt es, de acuerdo con la ley de Darcy.

$$dV = kAidt = kA \frac{h}{L} dt \quad (5.3)$$

Donde

- dV = Volumen de agua que atraviesa la muestra de suelo en un tiempo dt.
- K = Coeficiente de permeabilidad
- i = Gradiente hidráulico
- L = Longitud de la muestra

Al mismo tiempo en el tubo alimentador el agua sufre un descenso dh, que multiplicado por el area de la sección transversal, a, de dicho tubo, conduce a un volumen de agua igual al que atravesó la muestra de suelo en el dt. Por lo tanto igualando ambos volúmenes se tiene

$$kA \frac{h}{L} dt = -adh \quad (5.4)$$

Integrando esta ecuación

$$-a \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h} = \frac{kA}{L} \int_0^t dt \quad (5.5)$$

Se obtiene un valor de k igual a:

$$k = \frac{La}{At} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (5.6)$$

Mediante esta última expresión se determina el coeficiente de permeabilidad del suelo, efectuando varias determinaciones, hasta lograr resultados consistentes.

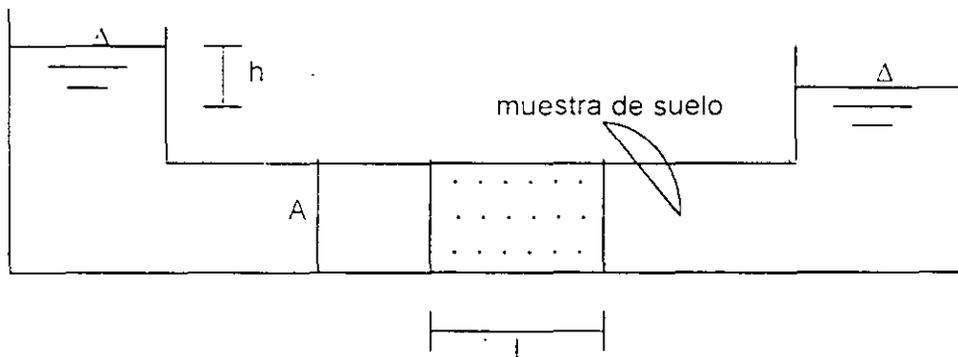


Fig. 5.1 Permeámetro de carga constante.

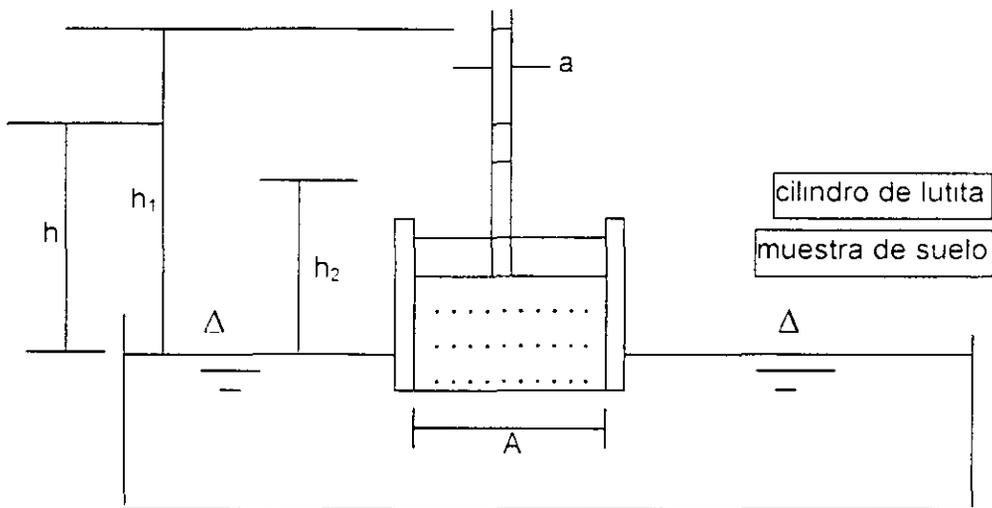
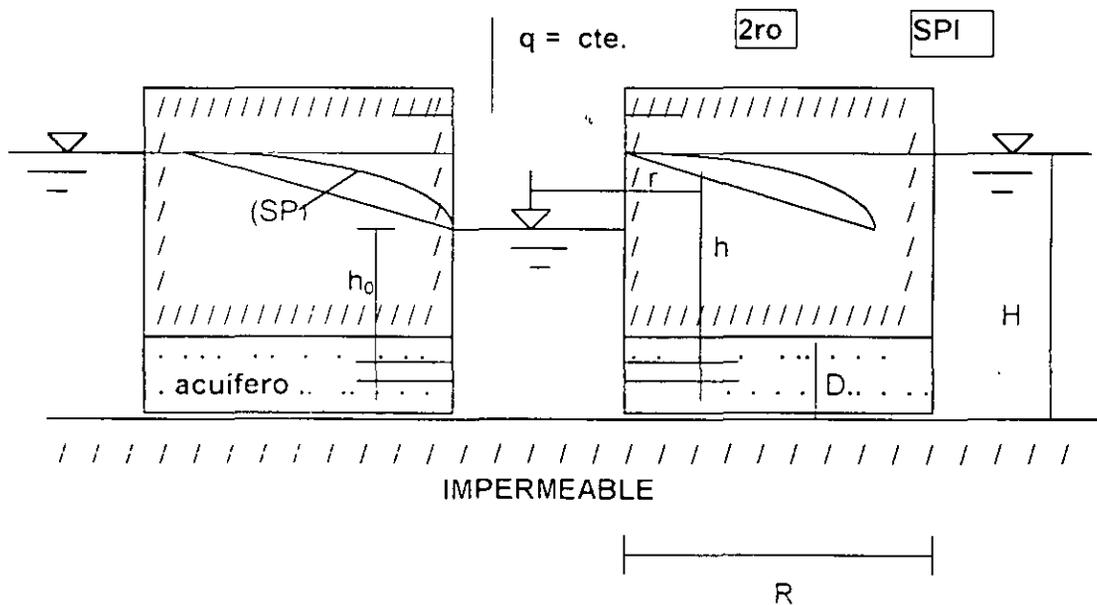


Fig. 5.2 Permeámetro de carga variable

PRUEBA IN SITU

Flujo establecido radial en pozos con penetración total en acuíferos artesianos



SP Superficie piezométrica

SPI Superficie piezométrica antes de iniciar el bombeo.

Fig. 5.3

En relación con la Fig 5.3, el gradiente hidráulico en cualquier punto del acuífero, está dado por la tangente a la superficie piezométrica en la sección vertical de interés. Esto es:

$$i = \frac{dh}{dr} \quad (5.7)$$

Una vez establecido el flujo es posible calcular el gasto extraído a través de un cilindro de radio r y vale.

$$q = kIA = k \frac{dh}{dr} 2\pi rD \quad (5.8)$$

Reordenando términos se tiene:

$$dh = \frac{q}{2\pi kD} \frac{dr}{r} \quad (5.9)$$

La integración de (5.9) conduce a:

$$h = \frac{q}{2\pi kD} \ln r + C \quad (5.10)$$

Donde C es una constante de integración que puede valuarse considerando la condición de frontera siguiente

Para $r = R$, $h = H$, por lo tanto

$$H = \frac{q}{2\pi kD} \ln R + C \quad , \quad \text{De donde:}$$

$$C = H - \frac{q}{2\pi kD} \text{Ln}k \quad (5.11)$$

Sustituyendo (5.11) en (5.10), se llega a

$$h = H - \frac{q}{2\pi kD} \text{Ln} \frac{R}{r} \quad (5.12)$$

Esta última expresión permite calcular la depresión de la superficie piezométrica en cualquier punto en torno al pozo y en el pozo mismo (h_0).

La ecuación (5.12) aplicada al nivel del pozo, permite calcular el gasto que puede extraerse para un abatimiento $S = H - h_0$, siempre y cuando se conozcan D , R , r_0 y k . Dicho gasto vale

$$q = 2\pi kD \frac{S}{\text{Ln} \frac{R}{r_0}} \quad (5.13)$$

La ecuación (5.13) se conoce como ecuación de equilibrio y fue establecida por G. Thiem

La misma ecuación (5.13) permite calcular el coeficiente de permeabilidad (k) del acuífero, siendo este

$$k = \frac{q}{2\pi DS} \text{Ln} \frac{R}{r_0} \quad (5.14)$$

Si se cuenta con dos pozos de observación, llevados hasta el acuífero artesiano, separadas las distancias r_1 y r_2 , del eje del pozo, es posible calcular el coeficiente de

permeabilidad del acuífero, mediante:

$$k = \frac{q}{2\pi D(h_1 - h_2)} \ln \frac{r_1}{r_2} \quad (5.15)$$

Donde

h_1 Nivel del agua en el pozo de observación 1.

h_2 : Nivel del agua en el pozo de observación 2.

La ecuación (5.15) resulta más cómoda de aplicar respecto a la (5.14) ya que no se requiere conocer el radio de influencia del pozo (R), para calcular el coeficiente de permeabilidad del acuífero

CURSO DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, PRIMERA PARTE

PRUEBAS DE PERMEABILIDAD DE CAMPO

Documento tomado de:

-Exploración y muestreo de suelos para proyectos de cimentaciones
PEMEX, 1976.

-Manual de mecánica de suelos
Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1970.

PRUEBA DE PERMEABILIDAD DE LEFRANC

Generalidades. Esta prueba permite determinar la permeabilidad local de suelos y rocas muy fracturadas localizados abajo del nivel freático. Para la medición de la permeabilidad de rocas sanas la prueba Lugeon es más apropiada sobre todo en la exploración para boquillas de presas. Para la determinación de permeabilidad en zonas grandes se utilizan las pruebas de bombeo

La prueba Lefranc en inyectar o extraer agua de una perforación con una carga hidráulica pequeña y medir el gasto correspondiente; la carga hidráulica puede ser constante o variable según el tipo de suelo; en general en suelos permeables ($k > 10^{-4}$ cm / seg) como arenas y gravas la prueba se hace de inyección y carga constante y en suelos poco permeables ($k < 10^{-4}$ cm / seg) como arenas finas, limos y arcillas se hace la prueba de extracción con carga variable

Equipo El equipo necesario para la prueba de inyección se muestra en la figura 55. está integrado con a) un tanque para suministrar un gasto constante, b) un tanque de volumen conocido para medir el gasto, c) tubería de conducción, d) una sonda eléctrica para determinar la posición del nivel de agua, e) además metálico N en caso de haberse usado en la perforación y f) un cono con una válvula de tres vías que permite el paso del agua a la conducción y la medición del gasto usando el tanque de volumen conocido; puede usarse un tubo Venturi para medir el gasto.

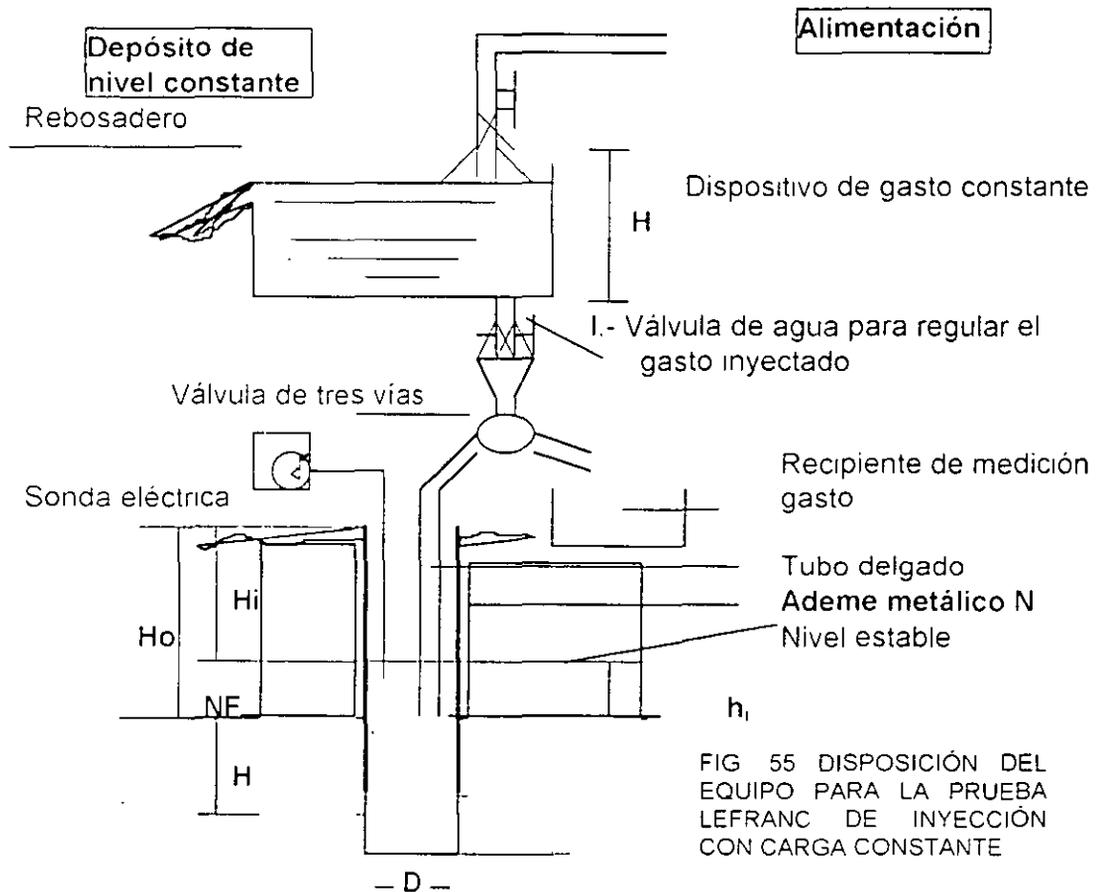


FIG 55 DISPOSICIÓN DEL EQUIPO PARA LA PRUEBA LEFRANC DE INYECCIÓN CON CARGA CONSTANTE

El equipo para la prueba de bombeo o extracción es todavía más simple, está compuesto por a) un tubo metálico cerrado en el fondo con el que se extrae agua de la perforación

bajándolo con un cable b) una sonda eléctrica para determinar la variación del nivel dentro de la perforación y c) ademe metálico en caso de no haberse usado en la perforación.

Procedimiento de operación. En ambas pruebas una vez instalado el equipo se coloca la parte inferior del ademe a una distancia L del fondo de la perforación que debe haber sido hecha sin lodo; esta distancia será nula para obtener la permeabilidad local horizontal, luego se mide la profundidad del nivel freático (H_0) respecto a la parte superior del ademe

En la prueba de inyección se llena el tanque y se abre la válvula de aguja y la de tres vías para introducir un gasto constante en la perforación, se mide con la sonda eléctrica la variación del nivel del agua en la perforación (H_i) con el tiempo respecto a la parte superior del ademe y se anota en la hoja de registro (capítulo G), cuando se haya estabilizado el nivel por 10 minutos se tendrá el valor de la profundidad (H_i) para el gasto (q_i) que se mide haciendo pasar el agua al recipiente de volumen conocido (V) y tomando el tiempo (t) que tarda en llenarse. estos datos se anotan también en el registro

Una vez medido el gasto se hace pasar el agua nuevamente a la perforación mediante la válvula de tres vías y se abre más la válvula de aguja para incrementar el gasto. Se hacen varias pruebas, generalmente cuatro, que se pueden realizar en unas dos horas en la prueba de extracción se determina la posición del nivel freático como en el caso anterior y se saca agua de la perforación con un recipiente de tubo, cerrado en la parte inferior, para abatir el nivel del agua (fig. 56) y se determina la posición del nivel del agua dentro del ademe a diferentes tiempos para poder hacer la gráfica recuperación - tiempo. La medición del nivel del agua dentro del ademe se hace respecto a la parte superior del mismo.

Interpretación. La interpretación de estas pruebas se hace basándose en la Ley de Darcy para las condiciones de flujo y de frontera impuestas en cada caso.

En la prueba de carga constante se obtiene la gráfica cargas - gastos. Las cargas (h_i) se calcula con la expresión

$$h_i = H_0 - H_i$$

donde:

h_i = carga hidráulica para un gasto q_i , metros

H_0 = posición inicial del nivel freático respecto a la parte superior del ademe, metros

H_i = posición estable del nivel de agua dentro del ademe para un gasto q_i , metros

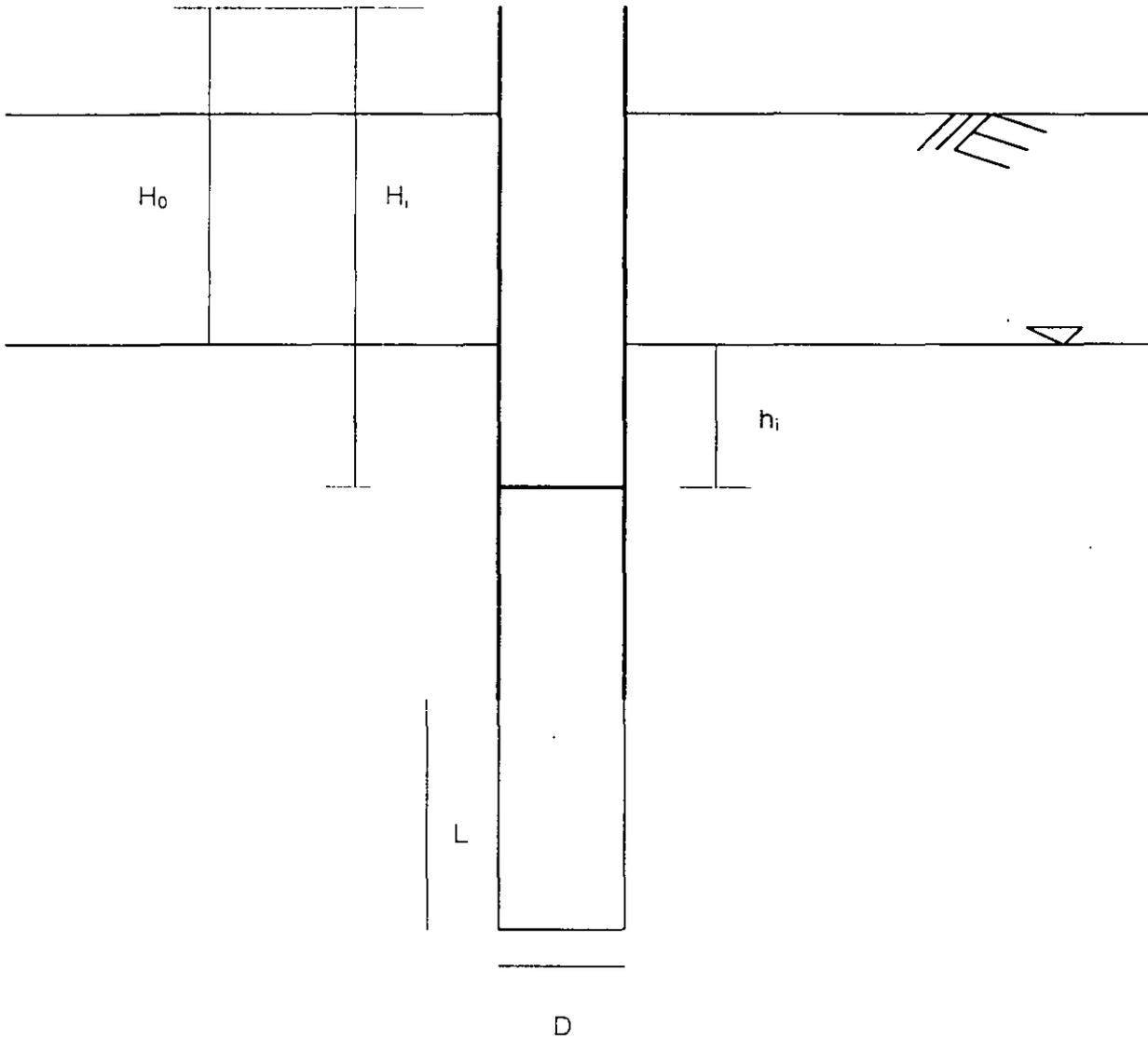


FIG. 56 PRUEBA LEFRANC DE EXTRACCION CON CARGA VARIABLE

y el gasto correspondiente para la profundidad estable H_i , se calcula con:

$$q_i = \frac{V}{t_i}$$

donde

q_i = es el gasto constante para la profundidad estable H_i , m^3 / seg

V = volumen del recipiente, m^3

t_i = tiempo que tarda en llenarse, seg

De la gráfica (fig 57) se puede determinar la permeabilidad aplicando la siguiente expresión

$$k = \frac{q_i}{c h_i} = \frac{m}{c}$$

donde:

k = coeficiente de permeabilidad m/seg

q_i = gasto constante inyectado m^3 / seg

c = coeficiente de forma (tabla 12), m

h_i = carga hidráulica

m = pendiente de la recta (fig. 57)

La relación L / D , figuras 55 y 56, define la forma aproximada de la cavidad en la que se genera el flujo y con ello el valor del coeficiente c (tabla 12), también define si la permeabilidad calculada corresponde a la vertical, horizontal o promedio

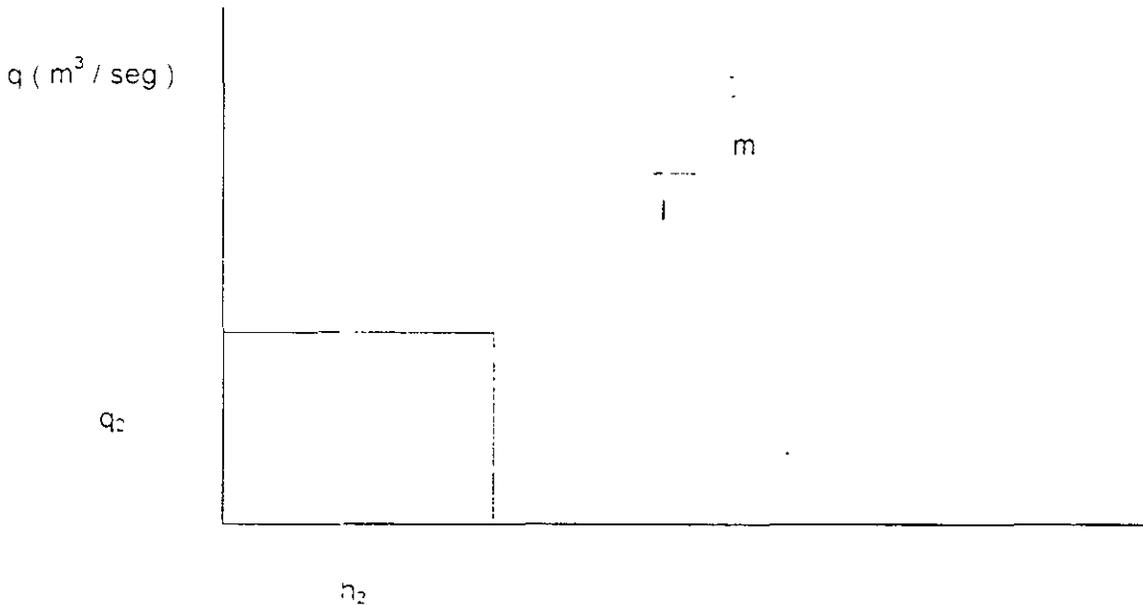


FIG. 57 GRÁFICA TÍPICA DE UNA PRUEBA LEFRANC DE CARGA CONSTANTE

TABLA 12

COEFICIENTE DE FORMA (Ref. 23)

| Relación L / D | Forma de la cavidad | Permeabilidad local | Coefficiente c |
|-----------------------|------------------------|------------------------|--|
| 0 | disco | vertical | $c = 2D$ |
| $0 < \frac{L}{D} < 1$ | esfera | promedio | $c = 2\pi D \sqrt{\frac{L}{D} + \frac{1}{4}}$ |
| $1 < \frac{L}{D} < 4$ | elipsoide | horizontal | $c = \frac{2\pi L}{L_n \left(\frac{L}{D} + \left(\frac{L^2}{D^2} + 1 \right)^{1/2} \right)}$ |
| > 4 | cilindro | | $c = \frac{2\pi L}{L_n \left(\frac{2L}{D} \right)}$ |

De la prueba de carga variable se obtiene la gráfica de recuperaciones - tiempo (fig 58) Las recuperaciones (h_1) para cada tiempo se calculan de igual forma que en el caso anterior ($h_1 = H_1 - H_0$)

El coeficiente de permeabilidad se calcula con la expresión:

$$k = \frac{\pi D^2}{4c (t_2 - t_1)} \log_e \frac{h_2}{h_1}$$

donde

k = coeficiente de permeabilidad, m/seg.

h_1 , h_2 = recuperaciones en los tiempos t_1 y t_2 , en metros.

t_1 , t_2 = tiempos en que fueron hechas las mediciones para determinar h_1 y h_2 .

seg

\log_e = logaritmo natural

c = coeficiente de forma (tabla 12), en metros.

D = diámetro de la perforación, figura 55, en metros.

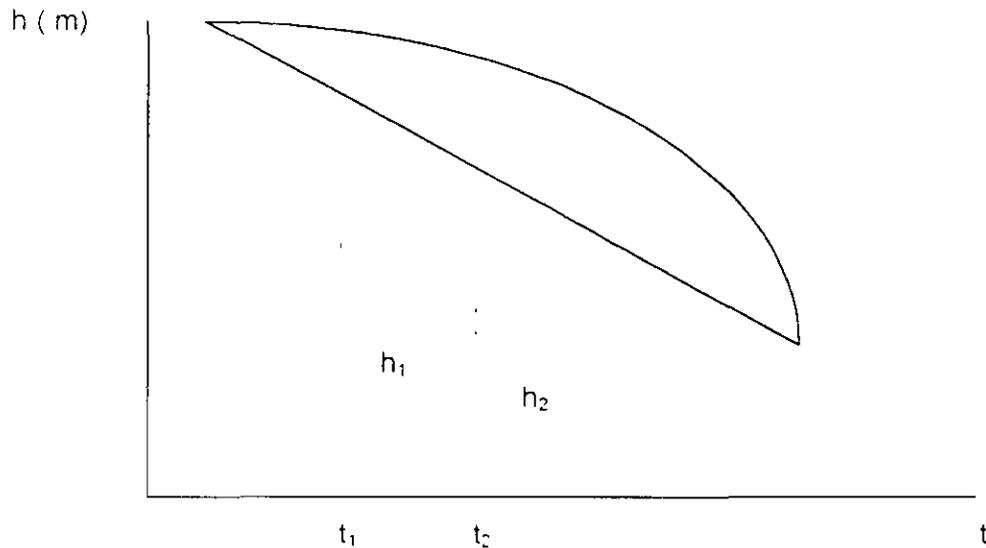


FIG 58 GRÁFICA TÍPICA DE UNA PRUEBA LEFRANC DE CARGA VARIABLE

Se calculan varios valores de k tomando pares de puntos contiguos de la gráfica recuperación - tiempo y con ellos se obtiene un valor promedio de k .

E.03

Prueba de permeabilidad Nasberg

Generalidades. La prueba nasberg permite determinar la permeabilidad local en los materiales no saturados se utiliza en rocas muy fracturadas y suelos, la medición se debe realizar en una perforación que no haya sido hecha con lodo.

Equipo El equipo que se requiere es el siguiente

a) sonda eléctrica, b) tubería de conducción, c) ademe N, d) medidor de gastos, que puede ser un tubo Venturi o un dispositivo como el usado en la prueba Lefranc de carga constante y e) tanque para suministro de agua.

Procedimiento. Instalado el equipo de manera similar al de la prueba Lefranc se levanta el ademe una distancia L encima de la base de la perforación (Fig. 59) y se determina

H_0 , se suministra agua a la perforación con un gasto constante, midiendo el nivel del agua dentro de la perforación; se anota en la hoja de registro (capítulo G) la variación del nivel con el tiempo y cuando se haya estabilizado el nivel del agua durante 10 minutos se tendrá la profundidad de equilibrio (H_1) para el gasto suministrado (q_i). se hacen varias determinaciones con diferentes gastos para calcular el promedio de permeabilidad.

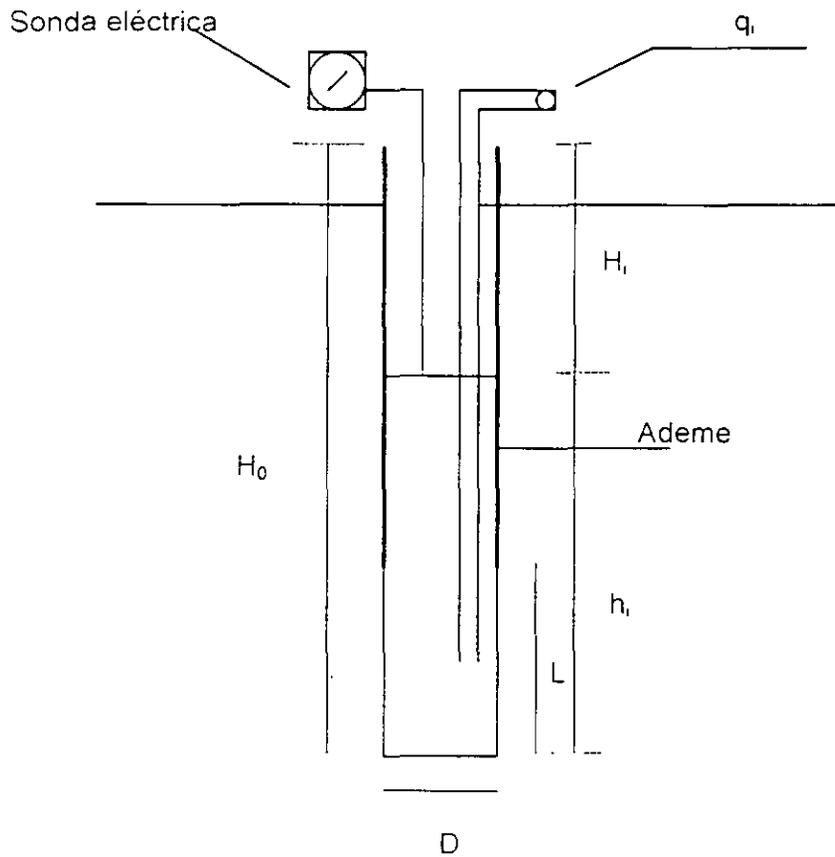


FIG. 59. PRUEBA DE PERMEABILIDAD NASBERG

Interpretación la permeabilidad se calcula usando la expresión:

$$k_i = \frac{0.423}{h_i^2} q_i \log_{10} \frac{4h_i}{D}$$

donde

k_i = coeficiente de permeabilidad local horizontal, m/seg

$h_i = H_i - H$ = carga hidráulica de equilibrio, metros

q = constante suministrado, m³/ seg

D = diámetro de la perforación, metros

La fórmula anterior es aplicable para

$$25 < \frac{h}{D} < 100$$

y el radio (R) de influencia de la prueba es

$$R = \sqrt{\frac{q}{\pi k}}$$

Si $L < D$ la permeabilidad determinada es vertical y

si $L > 4D$ será horizontal

1 2 3 Pruebas de bombeo

Para estimar la permeabilidad de un manto potente de material permeable, del que es difícil obtener muestras inalteradas, es recomendable recurrir a una prueba de bombeo, la cual se lleva a cabo perforando un pozo central de bombeo con ademe ranurado y en forma concentrica, una serie de pozos de observación , donde se colocan ademes ranurados para observar directamente la superficie libre del cono de abatimiento creado por el bombeo (manto homogéneo) o piezómetros, con el objeto de conocer las presiones de agua en toda la zona afectada (manto heterogéneo).

La interpretación de la prueba y en particular, el cálculo del coeficiente de permeabilidad del medio supuesto homogéneo pueden hacerse por medio de las fórmulas de Dupuit-

Thiem o de Theis-Lubin, que se aplican a escurrimientos en régimen permanente y transitorio respectivamente. ambos métodos suponen que el pozo de bombeo abarca la totalidad del manto permeable, sin embargo la prueba puede realizarse sin incurrir en grave error con un pozo que cubra solo parcialmente el manto.

a) Equipo

El equipo para realizar una prueba de bombeo es el siguiente:

Un ademe ranurado para el pozo de bombeo

Una bomba de pozo profundo

Un tanque amortiguador en la descarga de la bomba, el cual constará de una malla de acero, rellena de grava para disipar la energía del agua, así como un medidor de gastos (del tipo vertedor triangular delgado y escala de gancho o venturi)

Canal para alejar de la zona bajo estudio el agua bombeada

Tuberías ranuradas para los pozos de observación ó dos piezómetros; las ranuras son generalmente de 3 mm de ancho y 10 cm de longitud, y se encuentran distribuidas a razón de 20 ranuras por metro.

Sonda de tipo eléctrico para medición de los niveles en los pozos de observación o piezómetros.

Reloj.

Herramientas diversas.

b) Procedimiento

Habiendo instalado en la zona de interés el conjunto de elementos necesarios para la realización de la prueba, se empieza a bombear con un valor del gasto prefijado despues de haber anotado los niveles iniciales de agua en los pozos de observación o piezómetros. Durante los primeros momentos de bombeo es necesario tomar lecturas continuas de los niveles, con objeto de disponer de datos suficientes durante la etapa de flujo transitorio. Posteriormente pueden aumentarse el intervalo de tiempo entre mediciones. En caso de querer interpretar los datos con base en la teoría de Dupuit, es necesario esperar, manteniendo el gasto de bombeo constante, a que el flujo de agua sea permanente. lo cual significa que los niveles de la superficie de escurrimiento alrededor del pozo de bombeo se mantengan constantes. Habiendo alcanzado este estado, se suspende el bombeo, y se observa la recuperación de los niveles de la superficie de escurrimiento. En la misma forma que durante el inicio del bombeo, se toman lecturas continuas de dichos niveles durante la etapa transitoria

Habiendose recuperado totalmente el nivel de agua alrededor del pozo de bombeo, se vuelve a bombear agua, pero con valor del gasto diferente al inicial, y se prosigue con la misma secuencia de operaciones.

Según que se usen los pozos de observación o piezómetros, se registran los datos en las laminas 1 3 0 1 4

c) Interpretación de las pruebas

Los datos de las pruebas se interpretan según el método de Theis-Lubin para el flujo transitorio y de Dupuit para el flujo establecido. Los resultados arrojados por los dos métodos son similares, pero el del flujo establecido tiene la desventaja de requerir tiempos de bombeo muy largos para lograr la estabilización de niveles, suponiendo que esta pueda lograrse efectivamente.

Método de Theis-Lubin

Este método se basa en las hipótesis siguientes:

El manto permeable es homogéneo, isótropo, de permeabilidad uniforme y extensión infinita

El pozo central de bombeo atraviesa todo el espesor del manto acuífero y su radio es muy pequeño. El agua fluye inmediatamente fuera de la zona abatida.

La fórmula de Theis-Lubin proporciona el valor de la transmisibilidad, T , de un manto, conociendo el valor del gasto constante de bombeo, q , y del abatimiento, Δ , del nivel freático, en un pozo, a una distancia R del pozo central, después de cierto tiempo de bombeo, t . La transmisibilidad, t , es el producto del coeficiente de permeabilidad horizontal del terreno, K , por el espesor, H , del manto permeable, $T = KH$.

La fórmula de Theis-Lubin es la siguiente:

$$\Delta = \frac{q}{4\pi T} \int_{\frac{R^2 S}{4t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

S.R.H

DIRECCIÓN DE PROYECTOS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA EXPERIMENTAL
MECANICA DE SUELOS
PERMEABILIDAD DE CAMPO
PRUEBA DE BOMBEO
NIVELES EN POZOS TESTIGOS

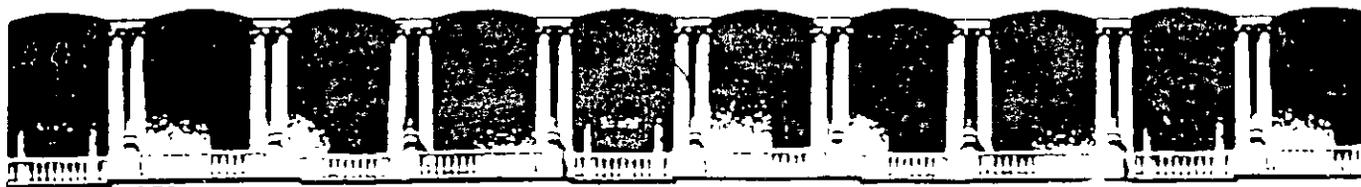
Obra _____
Localización _____ Fecha _____
Gasto de Bombeo, Q _____ m³/seg, inicio de bombeo _____ hr ___ min; Suspensión _____ hr ___ min

| Pozo No | R, en m | Profundidad en m | Cota boca del pozo | Hora de lectura | t (min) | | Z, en m | h , en m | Δ, en m | Δ / Q | t / R ² |
|---------|---------|------------------|--------------------|-----------------|-----------|------|---------|----------|---------|-------|--------------------|
| | | | | | INICIO | SUSP | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |

- R Distancias al pozo central de bombeo
- z lecturas de la boca del pozo c a la superficie del agua
- h Alturas de agua referidas al nivel de bombeo
- t y t' Tiempos transcurridos desde el inicio y la suspensión del bombeo

Observaciones _____
Operador _____ Cálculo _____ Fecha _____

Lámina 1.3



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS I

TEMA

COMPACTACIÓN DE LOS SUELOS

**CONFERENCISTA
M. en I. MANUEL MENDOZA LÓPEZ
PALACIO DE MINERÍA
MAYO 2000**

COMPACTACION

CONTENIDO

| TEMA | PAGINA |
|--|--------|
| I. INTRODUCCION | 3 |
| II. PROCEDIMIENTOS PARA COMPACTAR | 4 |
| 2.1 PROCESOS DE COMPACTACION DE CAMPO | 4 |
| 2.2 OBJETIVOS DE LAS PRUEBAS DE COMPACTACION | 8 |
| 2.3 PROCEDIMIENTOS DE COMPACTACION EN EL LABORATORIO | 8 |
| III. COMPORTAMIENTO MECANICO DE SUELOS COMPACTADOS | 15 |
| 3.1. SUELOS FINOS PLASTICOS | 15 |
| 3.2. SUELOS GRUESOS | 20 |
| IV. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE COMPACTACION | 21 |
| 4.1. POR PARTE DEL MATERIAL | 21 |
| 4.2. POR PARTE DEL PROCEDIMIENTO DE PREPARACION DEL MATERIAL | 22 |
| 4.3 POR EL PROCEDIMIENTO DE COMPACTACION | 23 |
| REFERENCIAS | 24 |
| TABLAS Y FIGURAS | 25 |

COMPACTACION

I. INTRODUCCION

Se entiende por compactación de los suelos el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas por medios mecánicos.

Tanto en la compactación como en la consolidación se da un proceso de reducción de vacíos; pero, mientras que en el proceso de consolidación esa reducción, debida a la aplicación de cargas estáticas, es relativamente lenta, en el proceso de compactación la reducción de vacíos, debida a la aplicación de cargas estáticas o dinámicas, es más o menos rápida.

La compactación puede obedecer a muchos objetivos; el principal de ellos es obtener un suelo de tal manera estructurado que posea y mantenga un comportamiento mecánico adecuado a través de toda la vida útil de la obra. Las propiedades requeridas pueden variar de caso a caso, pero la resistencia, la compresibilidad y una adecuada relación esfuerzo-deformación figuran entre aquellas cuyo mejoramiento se busca siempre; es menos frecuente, pero a veces no menos importante, que también se compacte para obtener unas características idóneas de permeabilidad y flexibilidad. Finalmente, como consecuencia de un proceso de compactación, suele favorecerse mucho la permanencia de la estructura térrea ante la acción de los agentes erosivos. Debe garantizarse que se mantengan las propiedades mejoradas, durante toda la vida útil de la obra.

Ciertas experiencias, realizadas en los primeros años de la aplicación de las técnicas modernas de compactación, indicaron que existe una correlación entre peso volumétrico seco y la o las propiedades del material que se requiere mejorar. Sin embargo esa correlación no es tan simple y segura como se pensaba, por lo que el aumento de peso volumétrico es meramente un medio, pero no un fin en si mismo.

RR. Proctor a principios de los años treinta realizó la construcción de presas para el Departamento Hidráulico de los Angeles, California, en donde desarrolló los principios de la compactación y los publicó en la revista "Engineering News-Record". En su honor las pruebas comunes de compactación se denominan comúnmente pruebas Proctor de compactación. El estableció que la compactación básicamente es función de cuatro variables: 1) Peso específico seco, γ_d , 2) Contenido de agua, $\omega\%$, 3) Energía específica, y 4) Tipo y características del suelo (graduación, presencia de minerales de arcilla, etc.).

El proceso de compactación puede ilustrarse mejor considerando la prueba común de compactación o prueba Proctor. Se hacen varios ensayos a una muestra del mismo suelo que se este compactando de acuerdo a las especificaciones para la prueba Proctor estándar, dadas más adelante, pero variando el contenido de agua del material. Para cada contenido de agua se obtiene su respectivo peso específico seco. Cuando quedan determinados los pesos específicos secos para cada ensaye se grafican contra los contenidos de agua, con lo que se obtiene una curva llamada curva de compactación, aún esta curva (curva A). Se puede notar que la curva de compactación, aún con contenidos altos de agua, nunca alcanza la curva para 100% de saturación

(llamada curva de saturación). El punto máximo (γ_{dmax}) para la prueba; su correspondiente contenido de agua es conocido como " contenido de agua óptimo ". La curva B es la curva de compactación obtenida con la prueba Proctor modificada, que utiliza una mayor energía de compactación. El caso es que, incrementando la energía de compactación, el peso específico máximo tiende a incrementarse, como es de esperarse, pero disminuye el contenido óptimo de agua. La curva dibujada a través de los puntos pico de varias curvas de compactación para diferentes energías específicas se denominan " líneas de óptimos ", la cual es paralela a la curva de saturación.

La figura 2 muestra algunas curvas típicas de compactación para diferentes tipos de suelo, obteniéndose con la prueba Proctor estándar.

II. PROCEDIMIENTOS PARA COMPACTAR

II.1 PROCESOS DE COMPACTACION DE CAMPO

la energía que se requiere para compactar los suelos en el campo se puede aplicar mediante cualquiera de las cuatro formas que enseguida se enumeran, las que se diferencian por la naturaleza de los esfuerzos aplicados y por la duración de los mismos. Estas formas son:

- a) Por presión
- b) Por impacto
- c) Por amasado
- d) Por vibración

II.1.1 COMPACTADORES POR PRESIÓN

RODILLOS LISOS METALICOS

Cuando estos equipos inician la compactación de una capa en el área de contacto es más o menos ancha y se forma un bulbo de presión de una cierta profundidad. Conforme avanza la compactación el ancho del área de contacto se reduce, y por lo tanto también se reduce la profundidad del bulbo de presión y aumentan los esfuerzos de compresión en la cercanía de la superficie. Estos esfuerzos son con frecuencia suficientes para triturar los agregados en materiales granulares, e invariablemente causan la formación de una costra en la superficie de la capa, lo que se conoce como encarpamiento. El efecto de la compactación de los rodillos lisos se reduce considerablemente a medida que se profundiza en la capa compactada, y el efecto de la compactación se produce d arriba hacia abajo.

Los rodillos lisos tienen su campo de aplicación circunscrito a los materiales que no requieren concentraciones elevadas de presión, por no formar grumos o no requerir disgregado; por lo general son arenas y gravas relativamente limpias. Cuando se utiliza sólo el rodillo liso en arcilla y limos plásticos es común que al cabo de un cierto número de pasadas lleguen a presentarse fracturas en la parte superior de la capa, debido a la rigidez que esta zona adquiere por excesiva compactación, en comparación con el lecho

inferior de la misma capa, menos compactado, que adquiere una resistencia relativamente baja.

RODILLOS NEUMATICOS

La acción compactada del rodillo neumático tiene lugar fundamentalmente por la presión que transmite a la capa de suelo tendida. Sus bulbos de presión son semejantes a los de los rodillos metálicos, pero el área de contacto permanece constante por lo que no se produce el efecto de reducción del bulbo. Estos rodillos producen un cierto efecto de amasado, que causa al suelo grandes deformaciones angulares por las irregularidades (dibujo) de las llantas; este efecto es mucho menor que el amasado que se consigue con los rodillos pata de cabra.

La superficie de contacto de la llanta depende del peso del rodillo y de la presión de inflado; su forma es más o menos elíptica. La presión que se transmite no es rigurosamente uniforme en toda el área de aplicación, pero para simplificar suele hablarse de una presión media de contacto. Para lograr una aplicación más o menos uniforme de la presión a una cierta profundidad bajo la superficie es preciso que las llantas delanteras y traseras del equipo tengan huellas que se superpongan ligeramente; es usual buscar una disposición tal que deje a ambos lados $2/3$ de huella libre entre las superposiciones. Podría pensarse que la eficacia compactadora crece de manera indiscriminada con la presión de inflado, pero esto no es del todo cierto, pues si la presión no es demasiado grande, en ambos lados de la huella se producen concentraciones que hacen aparecer presiones horizontales adicionales que ayudan al asentamiento de las partículas de suelo y a su mezclado. El acabado superficial de las capas compactadas con rodillos neumáticos suele tener una rugosidad suficiente para garantizar una buena liga con la capa superior.

Los rodillos neumáticos se usan principalmente en los suelos arenosos con finos poco plásticos, en los que no existen grumos cuya disgregación requiera grandes concentraciones de presión, como las que producen los rodillos pata de cabra. En limos poco plásticos también son eficientes los rodillos neumáticos.

II.1.2. COMPACTADORES POR IMPACTO

RODILLO DE IMPACTO (TAMPER)

Estos equipos son semejantes en muchos aspectos a los rodillos pata de cabra, pero capaces de operar a velocidades mucho mayores que estos últimos, lo que produce efecto de impacto sobre la capa de suelo que se compacta. Este es un rodillo metálico en el que se han fijado unas salientes en forma aproximada de una pirámide rectangular truncada.

Estas pirámides no son de la misma altura pues hay unas más altas que otras. Estas salientes han sido diseñadas de tal manera que el área de contacto se incrementa con la penetración, ajustándose automáticamente la presión a la resistencia del suelo compactado. El diseño contempla también la entrada y salida a la capa, lo que disminuye la resistencia al rodamiento. Estos rodillos han probado ser muy eficientes y eliminan la

posibilidad de estratificación en los terraplenes, esto es de importancia en corazones impermeables de presas.

El rodillo de impacto es uno de los más versátiles equipos de compactación. Este equipo tiene su mejor rendimiento en suelos finos con abundante contenido de grava y guijarros o en suelos finos residuales que contengan fragmentos de roca parcialmente intemperizados.

PISONES

El empleo de estos equipos está restringido a áreas pequeñas.

Los pisones pueden ir desde los de tipo más elemental, de caída libre y accionados a mano, hasta aparatos bastante más complicados movidos por compresión neumática o por combustión interna.

Los pistones de caída libre pueden ser desde simples mazas unidas a un mango y accionadas por una persona, hasta mazas de 2 ó 3 toneladas que se izan con cables y se dejan caer desde uno o dos metros de altura. Estos modelos pesados, accionados por una máquina apropiada, se han usado con éxito en la compactación de grandes fragmentos de roca.

Los pistones neumáticos o de explosión se levantan del suelo por la reacción que ellos mismos generan al funcionar contra el propio suelo, lo que basta para elevarlos 15 ó 20 cm. Se les considera apropiados para compactar suelos finos.

II.1.3 COMPACTADORES POR AMASADO

RODILLOS PATA DE CABRA

Estos compactadores concentran su peso sobre el área de contacto de un conjunto de puntas de forma variada, que penetran al suelo, ejerciendo presiones estáticas muy grandes en los puntos en que estas protuberancias ejercen su acción. Conforme se van dando pasadas y el material se va compactando, las patas profundizan cada vez menos en el suelo, y llega un momento en que ya no se produce ninguna compactación adicional; en una cierta profundidad pequeña, la superficie queda siempre distorsionada pero se compacta bajo la siguiente capa que se tienda.

La presión que ejerce el rodillo pata de cabra al pasar con sus vástagos sobre el suelo no es uniforme en el tiempo; los vástagos penetran ejerciendo presiones crecientes, las cuales llegan a un máximo en el instante en que el vástago está vertical y llega en su máxima penetración; a partir de ese momento la presión disminuye hasta que el vástago sale. Además, la acción del rodillo es tal que hace progresar la compactación de la capa de suelo de abajo hacia arriba; en las primeras pasadas las protuberancias y una parte del tambor mismo penetran en el suelo, lo que permite que la mayor presión se ejerza en el lecho inferior de la capa por compactar, para que esto ocurra el espesor de la capa no debe ser mucho mayor que la longitud del vástago. A esta peculiar manera de compactar se le denomina acción de "amasado".

Al aumentar el número de pasadas del equipo la parte inferior de la capa va adquiriendo mayor resistencia, lo que impide la penetración del rodillo y de sus vástagos, que así van compactando el suelo suprayacente. El proceso puede llegar a un límite en el que el rodillo "camina" sobre el suelo y transmite todo su peso a través de los vástagos, pero sin que haya contacto entre el tambor y el suelo propiamente dicho. El rodillo pata de cabra produce dos efectos muy deseables en los terraplenes de suelos finos compactados, que son una distribución uniforme de la energía de compactación en cada capa y una buena liga entre capas sucesivas.

Los rodillos pata de cabra rinden sus mejores resultados en suelos finos. La concentración de presión que producen los vástagos se ha revelado muy útil para la rotura y disgregación de los grumos que se forman en las arcillas homogéneas por la acción de fuerzas de naturaleza capilar entre sus partículas. En suelos finos no homogéneos, con diferentes rangos de tamaños, la acción de las patas de cabra también es unir entre sí las distintas capas de material compactado, pues al quedar distorsionada la superficie de cada capa, se compacta junto con la siguiente, lo que elimina la tendencia a la laminación. En arcillas blandas francas, además de que tiene la posibilidad de eliminar grumos, el rodillo pata de cabra resulta muy conveniente por la acción de amasado ya descrita. En épocas recientes incluso se ha combinado la acción de los rodillos pata de cabra con la vibración, para incrementar la concentración de fuerzas sobre áreas pequeñas y favorecer el poder rompedor y mezclador de estos equipos.

Se han desarrollado dos tipos de compactadores que pueden considerarse como variantes del rodillo pata de cabra tradicional: el rodillo de rejillas y el segmentado.

RODILLO DE REJILLAS

La superficie del cilindro del equipo la constituye una parrilla o malla fabricada con barras de acero, que forman una cuadrícula.

El rodillo de rejillas se ha venido utilizando con éxito en materiales que requieren disgregación, pero en realidad ha dado resultado en una gran variedad de suelos, incluyendo arcillas homogéneas o mezclas de arenas, limos y arcillas, con abundancia de finos. Suelen lastrarse con bloques de concreto o arena húmeda para elevar su presión de contacto.

RODILLO SEGMENTADO

Cada cilindro del equipo suele estar formado por tres ruedas adosadas, de aro interrumpido, lo cual forma la segmentación que da su nombre al equipo.

El rodillo segmentado se ha utilizado sobre todo con materiales que requieren disgregación, pero su uso se ha extendido a varios tipos de suelo, incluso las arcillas no muy plásticas.

II.1.4 COMPACTADORES POR VIBRACION

RODILLOS VIBRATORIOS

Estos rodillos funcionan disminuyendo temporalmente la fricción interna del suelo. La vibración provoca un reacomodo de las partículas que da por resultado un incremento del peso volumétrico del suelo.

Estos rodillos pueden producir un gran trabajo de compactación en relación a su peso estático ya que la principal fuente de trabajo es la fuerza dinámica de compactación.

Como la resistencia de los suelos plásticos depende de la cohesión, la eficiencia de estos rodillos está casi limitada a suelos granulares.

Buscando extender ventajas a suelos cohesivos se han desarrollado rodillos pata de cabra vibratorios, en lo que la fuerza y la amplitud de vibración se han aumentado, y se ha disminuido la frecuencia. Con el mismo objeto se han acoplado dos rodillos vibratorios, " fuera de fase ", a un marco rígido para obtener efecto de amasamiento.

II.2 OBJETIVOS DE LAS PRUEBAS DE COMPACTACION

los procesos de compactación de campo son en general demasiado lentos y costosos como para reproducirlos a voluntad, cada vez que se desee estudiar cualesquiera de sus detalles; no proporcionan un modo práctico de disponer de una herramienta de análisis, estudio e investigación, tal como lo requiere el problema de la compactación de suelos, con sus muchas complicaciones y complejidades. Así, la tendencia a desarrollar pruebas de laboratorio que se reproduzcan fácil y económicamente aquellos procesos debió de ser obvia para cualquiera que se interesa (e interese) en racionalizar las técnicas de campo y en conocer más un proceso tan difícil e importante.

Las mismas razones inducen a las pruebas de laboratorio a ser base de estudios para proyecto y fuente de información para planear un adecuado tren de trabajo de campo.

Actualmente se hacen dos usos principales de las pruebas de compactación de laboratorio. En el primero, se compactan los suelos para obtener datos para proyecto de estructuras de tierra; esta información se refiere a resistencia, deformabilidad, permeabilidad, susceptibilidad al agrietamiento, etc. El segundo uso que se hace de las pruebas de compactación es con fines de control de calidad; en este caso, la prueba funciona fundamentalmente como un índice comparativo del peso volumétrico de laboratorio y de campo.

II.3. PROCEDIMIENTOS DE COMPACTACION EN EL LABORATORIO

Las pruebas de compactación que se realizan en el laboratorio pueden agruparse en alguno de los siguientes casos:

- a) Pruebas estáticas
- b) Pruebas dinámicas

- c) Pruebas por amasado
- d) Pruebas por vibración

II.3.1 PRUEBAS ESTATICAS

PRUEBA PORTER

En esta prueba se compacta al suelo colocándolo dentro de un molde cilíndrico de 15.24 cm (6") de diámetro; el suelo se dispone en tres capas acomodándolo con 25 golpes de una varilla con punta de bala, lo que no significa una compactación intensa, pues la varilla es ligera y la altura de caída es la mínima utilizable por el operador para una manipulación cómoda. la compactación propiamente dicha se logra al aplicar al conjunto de las tres capas una presión de 140.6 Kg. / cm², la cual se mantiene durante un minuto.

PRUEBA PORTER SOP

Este método de prueba sirve para determinar el peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima en suelos con partículas gruesas que se emplean en la construcción de terracerías; también se puede efectuar en arenas y en materiales finos cuyo índice plástico sea menor de seis. El método consiste en preparar especímenes con material que pasa la malla de 25.4 mm (1"), a los que se agregan diferentes cantidades de agua y se compactan con carga estática. Una vez preparado el material, el procedimiento de prueba es como sigue:

1) Colóquese el material preparado dentro del molde en tres capas; con la punta de la varilla metálica de 1.9 cm (¾ ") de diámetro y 30 cm de longitud, désele a cada una de las capas 25 golpes, uniformemente distribuidos.

2) Al terminar la colocación de la última capa, tómesese el molde que contiene el material, colóquese en la máquina de compresión y compáctese el material aplicando lentamente carga uniforme, de manera que se alcance en un lapso de 5 minutos la presión de 140.6 kg. / cm², equivalente a una carga de 26.5 toneladas, aproximadamente; manténgase esa carga durante un minuto y hágase la descarga en el siguiente minuto. Al llegar a la carga máxima revítese la base del molde; si está ligeramente humedecida, el material ha alcanzado la humedad óptima de compactación y su peso volumétrico seco máximo.

3) Si al llegar a la carga máxima no se humedece la base del molde, la humedad con que se preparó la muestra es inferior a la óptima; por lo tanto prepárese otra fracción representativa del material y adiciónesele una cantidad de agua igual a la del espécimen anterior más 80 cm³.

4) Repítanse los pasos 1 y 2 en este material ya preparado. Prepárense los especímenes que sean necesarios siguiendo los mismos pasos anteriores, hasta lograr que en uno de ellos se inicie el humedecimiento de la base del molde con la carga máxima.

5) Si antes de llegar a la carga máxima se humedece la base del molde por haberse iniciado la expulsión de agua, la humedad con que se preparó la muestra es superior a la

óptima. En este caso procédase como en el párrafo 3, pero en vez de adicionar 80 cm³ se reduce esa cantidad en cada una de las nuevas fracciones representativas del material, hasta lograr que en una de ellas se inicie el humedecimiento de la base del molde con la carga máxima.

6) Al terminar la compactación del espécimen preparado con la humedad óptima, quítese el molde de la máquina de compresión y determínese la altura (h_e), restando la altura total del molde la altura entre la cara superior del espécimen y el borde superior del molde; regístrese este valor en cm, con aproximación de un décimo de milímetro.

7) Pésese el molde de compactación que contenga el espécimen compactado y anótese dicho peso, en kilogramos, con aproximación de un gramo.

8) Sáquese el espécimen del cilindro, córtese longitudinalmente y de la parte central obténgase una muestra representativa y efectúese en la muestra la determinación del contenido de agua, anotando su valor.

II.3.2 PRUEBAS DINAMICAS

PRUEBA DE COMPACTACION POR IMPACTO TIPO PROCTOR. PRUEBA PROCTOR (AASHO) ESTANDAR

Con esta prueba se determina la relación entre el peso volumétrico y el contenido de agua de los suelos. Existen 4 alternativas de prueba:

- Método A. Molde de 4" , suelo que pasa la malla # 4 , E =
- Método B. Molde de 6" , suelo que pasa la malla # 4 , E =
- Método C. Molde de 4" , suelo que pasa la malla de 3 / 4 " , E =
- Método D. Molde de 4" , suelo que pasa la malla de 3 / 4" , E =

Preparación de la muestra

- 1) Identificar el material
- 2) Para esta prueba se requiere una muestra representativa de suelo, debidamente cuarteada, con peso comprendido entre 2.5 y 3.0 Kg. para cada fracción de suelo que se necesite para el ensaye. Se seca al aire lo necesario para facilitar su disgregación.
- 3) Disgregar grumos con la mano de mortero cubierta de hule cuidando de no romper granos individuales.
- 4) A la muestra disgregada se la criba por la malla número 4
- 5) Obtener contenido de agua

- 6) Como la curva peso volumétrico seco-contenido de agua debe definirse entre 6 u 8 puntos (la mitad de ellos abajo del contenido óptimo de agua y la otra mitad arriba), prepárense las mismas porciones de suelo en recipientes con el contenido de agua deseado y déjense en reposo por lo menos 24 horas, con tapa hermética ; esto facilita una buena mezcla del agua y los finos. Si la plasticidad es alta deberá almacenarse el material por lo menos dos días. Las porciones de suelo deberán diferir en su contenido de agua de un espécimen a otro en dos puntos de porcentaje aproximadamente. Utilícese agua de buena calidad y mézclase al suelo con atomizador.
- 7) Pésese el molde Proctor con la placa - base adosada.
- 8) Colóquese el collarín de extensión sobre el molde.

Procedimiento de prueba

Se detallara el método A:

- 1) Selecciónese una de las muestras representativas de 3 Kg.
- 2) Divídase la muestra en el número de porciones que se requiera, según las capas que vayan a disponerse en el molde de 10.16 cm (4") de diámetro; en el caso presente serán 3 capas. El molde tendrá instalada su extensión y deberá llegarse a un espesor total compactado de 13 cm. Compáctese cada capa con 25 golpes del pisón (5.08 cm de diámetro y 2.49 kg. de peso) y distribuyéndolos uniformemente y con la altura de caída de 30.48 cm (12"). Durante la operación el molde deberá apoyarse en una base rígida. Después de la compactación, remuévase la extensión del molde y enrásese el suelo compactado, utilizando la regla metálica. Pésese el conjunto y réstese la tasa del molde, para tener el peso húmedo del material. Divídase entre el volumen del molde, para obtener el peso volumétrico de la masa de suelo (γ_m).
- 3) Retírese el material del molde, sin desmoronarlo y divídase el espécimen en dos porciones según un plano vertical por el centro de la sección transversal. Tómese una muestra representativa de una de las caras del corte y determinese el contenido de agua del suelo.
- 4) Continúense las determinaciones con las otras porciones de material con diferentes contenidos de agua, de preferencia en orden creciente, hasta que no cambie o disminuya el peso volumétrico húmedo del suelo.

PRUEBA DE COMPACTACION

- 1) De la muestra ya preparada y que ha pasado por la malla # 4, se toman aproximadamente 2.5 Kg., se ponen en la charola y se dejan secar al aire en caso de que este muy húmeda.
- 2) Se revuelve perfectamente el material, tratando de que el agua agregada se distribuya uniformemente.

- 3) Usando el cucharón se vacía en el cilindro Proctor, previamente armado con su extensión, material suficiente para obtener una capa floja de unos 8 cm de espesor.
- 4) Esta capa se compacta mediante 20 golpes de pistón (de 5 cm de diámetro y 2.75 kg. de peso), procurando repartirlos en toda su superficie y usando la guía metálica (de 48 cm de longitud) para que la altura de caída sea la misma. Los golpes del pistón se dan levantando éste hasta el nivel superior de la guía y dejándolo caer libremente.
- 5) Se vuelve a vaciar material en el cilindro para tener una segunda capa que, agregada a la primera, dé altura total de unos 11 ó 12 cm, compactándola del modo que la primera.
- 6) En idéntica forma, se procede con la tercera capa, procurando que una vez compactado el material, la superficie esté 1 ó 2 cm arriba del ensamble en la extensión.
- 7) Al terminar la compactación de las tres capas, con una espátula de cuchillo se recorre el perímetro exterior de la extensión para despegar el material y se quita cuidadosamente la extensión, enrasando la muestra al nivel superior del cilindro y rebanando el material sobrante con un enrasador.
- 8) Se limpia exteriormente el cilindro y se pesa con la muestra compactada en el platillo de la báscula, aproximando la lectura hasta los 5 g. El peso obtenido se anota en el registro de cálculo.
- 9) En una cápsula de porcelana vidrio refractario, previamente numerado y tarado, se toma una porción de la muestra compactada, aproximadamente 100 g, y se pesa al 0.1 de gramo en la balanza, anotando el valor.
- 10) Se desarma el cilindro Proctor con objeto de extraer fácilmente el material.
- 11) Para poder definir las condiciones óptimas del material, es necesario efectuar cuatro o cinco veces los pasos anteriores, incrementando en cada ensayo el contenido de agua.
- 12) Todas las cápsulas que contienen la muestra húmeda de cada ensayo se colocan dentro de un horno a 110° C. durante 18 horas como mínimo. Transcurrido este lapso se retiran del horno, dejándolas enfriar dentro de un desecador y se pesan, registrando el valor correspondiente.

II.3.3. PRUEBAS DE COMPACTACION POR AMASADO

PRUEBA POR COMPACTACION POR AMASADO HARVARD MINIATURA

Con este método de prueba se determina el peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima en suelos finos plásticos, con partículas menores de 2 mm.

Preparación de la muestra

- 1) Identificar el material
- 2) Para esta prueba se requiere una muestra representativa de suelo, debidamente cuarteada, con peso comprendida entre 1 y 1.5 kg. Se seca al aire lo necesario para facilitar su disgregación.
- 3) Disgregar grumos.
- 4) A la muestra disgregada manualmente se le criba por la malla número 10.
- 5) Obtener contenido de agua.
- 6) Como la curva peso volumétrico seco-contenido de agua debe definirse entre 6 u 8 puntos (la mitad de ellos abajo del contenido óptimo de agua y la otra mitad arriba), prepárense las mismas porciones de suelo en recipientes con el contenido de agua deseado y déjense en reposo por lo menos 24 horas; esto facilita una buena mezcla del agua y los finos. Las porciones de suelo deberán diferir en su contenido de agua de un espécimen a otro en dos puntos de porcentaje aproximadamente. utilícese agua de buena calidad y mézclase al suelo con atomizador.

Procedimiento de prueba.

- 1) Con el molde ajustado a su base y provisto de su extensión, colóquese en él la cantidad que se requiera de suelo en su estado suelto. La colocación del suelo dentro del molde deberá hacerse en el número de capas que se necesite (por lo común cinco); nivélese cada capa presionándola ligeramente con un pistón de hule.
- 2) Después de ajustar apropiadamente el resorte del pisón, insértese en el émbolo del pisón y presiónese hasta que el resorte se comprima hasta su tope. Quítese la presión , cámbiase ligeramente de posición el émbolo y repítase la operación, repartiendo así la presión aplicada de manera uniforme en la superficie de cada capa, hasta completar el número de aplicaciones necesarias.
- 3) Repítase este procedimiento para cada capa; procúrese que la capa superior sobresalga del molde por lo menos 1 cm (entrando en la extensión metálica del mismo).
- 4) Trasládese del conjunto del molde al aditamento para retirar la extensión; presiónese firmemente el émbolo del propio aparato y, a la vez, accionando el mecanismo extractor, suéltese el collar metálico del molde y del suelo compactado.

- 5) Quítese el molde de su base y enrásese con cuidado su borde superior con una regla metálica. Verifíquese también con la regla el enrasamiento del borde inferior del molde.
- 6) Pésese el molde que contiene al suelo compactado, con aproximación de 0.1 g.
- 7) Extráigase la muestra del molde utilizando el extractor y colóquesela en un recipiente apropiado para introducirla al horno y determinar su contenido de agua.
- 8) Compáctense otros especímenes con contenidos de agua crecientes, hasta que el peso húmedo de la muestra valla creciendo, hecho que señala que se ha sobrepasado el contenido de agua óptimo.
- 9) Calcúlese el peso volumétrico seco correspondiente a cada contenido de agua, mediante la fórmula

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + \omega}$$

y dibújese la curva de compactación para obtener el peso volumétrico máximo y el contenido óptimo de agua.

- 10) Se desea, cámbiase el procedimiento de compactación variando el número de aplicaciones del pisón por capa, la presión por capa o el número de capas.

PRUEBA DE HVEEM, DE COMPACTACION POR AMASADO

Esta prueba tiene por objeto representar en le laboratorio las condiciones de amasado que producen los equipos de compactación de campo.

Procedimiento

- 1) En los siguientes incisos se describe el procedimiento normal de fabricación del espécimen para suelos y agregados con finos que posean suficiente cohesión natural para mantener a los especímenes intactos durante los procesos de prueba. Los materiales sin cohesión, tales como agregados para bases, requieren del uso de canastillas de papel como ayuda para poder manejarlos sin que sufran alteraciones.
- 2) Colóquese el molde en el collarín con mango, que tiene un disco de hule de 10.00 cm (3-15 / 16") de diámetro y 0.32 cm (1 / 8 ") de espesor, pegado a la placa. Ajustese el molde para dejar un espaciamiento de 0.32 cm (1 / 8 ") entre el borde inferior del molde y la base del molde con mango. Sujétese un disco de cartulina de 10 cm (3-15 / 16") dentro del molde, sobre el disco de hule. Póngase en su lugar la extensión con embudo y el molde sobre la placa giratoria del compactador y atomílese.

- 3) Colóquese una muestra bien mezclada en el alimentador, con el material suelto y bien distribuido a lo largo de toda su extensión.
- 4) Echese a andar el compactador y ajústese la presión del aire del compactador a 1.05 Kg. / cm^2 (15 lb / in^2), lo cual equivale a una presión en el pisón de aproximadamente 16.85 kg / cm^2 (240 lb / in^2). Espérese hasta que el pisón alcance su posición más baja antes de colocar al material en el molde.
- 5) Con una espátula vallase depositando el material del alimentador en el molde de manera que se cubra su fondo; el resto de la muestra se vaciará en 20 partes iguales, una en cada aplicación del pisón; después proporciónense 10 aplicaciones más para asentar y nivelar todo el material. Levántese y límpiase el pisón y colóquese un disco de hule de 10 cm de diámetro en la parte superior del espécimen. Si durante todas las operaciones anteriores la presión de 1.05 kg / cm^2 resultó excesiva y produjo levantamiento del material alrededor del pisón, podrá bajarse dicha presión.
- 6) Aflójese el molde dentro del collarín con mango, manipulando los tornillos, bájese el pisón e increméntese la presión del aire hasta obtener una presión en el pisón de 24.6 kg / cm^2 (350 lb / in^2), lo que normalmente se logra con una lectura de 1.48 kg / cm^2 (21 lb / in^2) en el manómetro que mide la presión del aire.
- 7) Las arcillas pueden requerir presiones de compactación menores, pues en ellas el pisón penetra con facilidad; en estos casos la penetración del pisón deberá ser el factor que se observe; se debe buscar que no sea mayor que 0.64 cm ($1 / 4 \text{ "}$).
- 8) Aplíquese 100 veces el pisón al espécimen.
- 9) Si antes de las 100 aplicaciones aparece agua libre en la base del molde, deténgase el proceso de inmediato y anótese el número de aplicaciones.

III. COMPORTAMIENTO MECANICO DE SUELOS COMPACTADOS

III.1 SUELOS FINOS PLASTICOS

III.1.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO MECANICO

ESTRUCTURA DEL SUELO, CAMPO VS LABORATORIO

La estructura y las propiedades ingenieriles en el material compactado dependen grandemente del método o tipo de compactación, de la energía aplicada del tipo de suelo y del contenido de agua. Por ejemplo, en el caso de las arcillas las investigaciones han demostrado que cuando éstas son compactadas con contenidos de agua abajo del óptimo, la estructura de los suelos es esencialmente independiente de la forma y del tipo de compactación. A la humedad óptima, sin embargo, el tipo de compactación tiene un efecto significativo en la estructura, resistencia, compresibilidad, etcétera, del suelo. la

estructura del suelo se vuelve incrementadamente dispersa si se va aumentando el contenido de agua. En la rama izquierda de la curva de compactación los suelos son siempre flocculentos, mientras que en la rama derecha la estructura del suelo se vuelve más orientada o dispersa. En la figura 4, por ejemplo, la estructura en el punto c es más orientada que en el punto A (en donde el suelo tiene una estructura flocculenta, grumosa, o en castillo de naipes). Ahora si se incrementa la energía de compactación el suelo tiende a ser más orientado que en el punto A; Del lado derecho, la estructura del suelo en el punto D será algo más orientada que en el punto C, aunque el efecto es menos significativo que en el lado izquierdo.

La diferencia de propiedades que el suelo pueda tener con los diversos métodos de compactación que se utilizan, considerando un mismo nivel de energía, al compararlos, se espera que se deban únicamente a una diferencia en las estructuras, la cual sería atribuible sólo a diferencias en la magnitud de las deformaciones angulares inducidas por el método de compactación. En el máximo grado de orientación se logra por amasado y el mínimo por compactación estática.

A estructuras muy diferentes en el suelo corresponden propiedades fundamentales también muy diferentes. Por otro lado, casi todos los procesos de compactación de campo más usados, excluyendo la vibración, incluyen en mayor o menor grado efectos de amasado, en tanto que la compactación estática del laboratorio no puede considerarse representativa de ningún método actual de campo y, por ende, el uso de una prueba estática de laboratorio para estudios de suelos con fines de proyectar una estructura de tierra deberá cuestionarse seriamente. En el campo, el rodillo pata de cabra produce mayor orientación de partículas que el neumático.

SOLICITACIONES EN EL MATERIAL COMPACTADO

Al aumentar la energía de compactación, el aumento del peso volumétrico será tanto mayor cuanto menor sea el contenido de agua del suelo; cualquier incremento de energía que se aplica a un suelo con contenido de agua superior al óptimo se utiliza en producir deformación angular, pero no reducción de volumen; esto se debe a que un suelo con contenido de agua alto es más deformable y tiene bajo contenido de aire y por tanto, fase fluida menos compresible.

PREPARACION DEL SUELO

Como se detallará mas adelante, el rehuso y no lograr una homogénea compactación y, por ende, en el comportamiento mecánico de los suelos compactados.

III.1.2. PERMEABILIDAD

La permeabilidad de un suelo compactado depende de su relación de vacíos, de su estructura y de su grado de saturación. la permeabilidad puede relacionarse con el cuadrado de la relación de vacíos del suelo.

Para una misma energía, la permeabilidad de un suelo compactado disminuye al aumentar el contenido de agua y alcanza un mínimo próximo al contenido de agua óptimo; si incrementamos la energía utilizada el coeficiente de permeabilidad disminuye porque baja la relación de vacíos del suelo (incrementándose con ello el peso

específico seco). El cambio en la permeabilidad, modificando el contenido de agua, se ilustra en la figura 5, donde puede observarse que la permeabilidad tiene un orden de magnitud más alto para contenidos de agua abajo del óptimo, que para contenidos arriba del óptimo.

La estructuración es el factor que más afecta a la permeabilidad de un suelo compactado. A mayor contenido de agua y a mayor distorsión producida por la compactación (a lo que corresponde mayor orientación en las partículas) se obtiene menor permeabilidad y las diferencias por este efecto son muy importantes.

La figura 6 muestra las diferencias de permeabilidad que se obtuvieron para un suelo que se compactó en el campo con rodillo pata de cabra y en el laboratorio con un compactador de amasado, llegando siempre al mismo peso volumétrico seco con el mismo contenido de agua.

III.1.3 COMPRESIBILIDAD Y EXPANSION

Cuando un suelo arcilloso cambia de volumen existen dos componentes de deformación a nivel estructural. En primer lugar, la correspondiente a variaciones de las distancias entre las partículas con grado de orientación constante, y en segundo la que ocurre por reducciones de las distancias medias de las partículas, sin que cambie su distancia mínima por aumento de grado de orientación.

Si se compactan dos muestras de un suelo arcilloso con los mismos métodos y energías de compactación y al mismo peso volumétrico seco, pero empleando en un caso una humedad menor que la óptima y en el otro mayor, se obtiene un comportamiento en procesos de carga como la que se muestra en la figura 7.

En primer lugar, la muestra que se compactó en el lado húmedo (muestra 2) exhibe una curva de compresibilidad con la forma típica regular que corresponde al tipo de suelo de la prueba (arcilloso), en tanto que la muestra 1, compactada del lado seco, presenta una curva de compresibilidad que se diría compuesta de dos curvas convencionales. En suelos que se compactaron por amasado, se ha observado que la presión a la que aparece la transición, con variación brusca de pendiente, es ligeramente menor que el esfuerzo de compactación. Al parecer el aumento del coeficiente de compresibilidad (pendiente abrupta) se debe al predominio de la tendencia a la aproximación de las partículas con aumento del grado de compactación.

En segundo lugar, bajo presiones pequeñas, el coeficiente de compresibilidad del suelo compactado en el lado seco es menor que el del suelo que se compactó en el lado húmedo, pero esta situación se invierte bajo presiones grandes. Esto se debe a que bajo poca presión ocurren cambios insignificantes en el grado de orientación de las partículas de las dos muestras, y al ser mayor en la muestra 2 la distancia mínima entre partículas, la resistencia que oponen para aproximarse es más grande en esta muestra que en la 1; bajo grandes presiones, en la muestra 1 (del lado seco) ocurren deformaciones volumétricas debidas al aumento del grado de orientación de las partículas por colapso, que no tienen lugar en la muestra 2. Bajo presiones muy altas ambas muestras llegan a la misma relación de vacíos, pues en las dos llega a una estructuración similar.

La expansión de arcillas compactadas con contenidos de agua abajo de la humedad óptima, es grande; cuentan con una deficiencia relativa de agua y por eso tienen la tendencia de absorber agua y expandirse más que las compactadas con contenidos de agua por arriba de lo óptimo. La expansibilidad crece con la energía de compactación. Los suelos compactados con contenido de agua abajo del óptimo son, en general, más sensibles a los cambios de ambiente. lo contrario sucede para la contracción, como se muestra en la figura 9, donde se observa que los suelos compactados con contenidos de agua arriba del óptimo, tienen una contracción mas alta. También se observa en la figura 8 el efecto que tiene el método de compactación en la contracción del suelo.

III.1.4 RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE

La resistencia al desplazamiento relativo de las partículas de un suelo arcilloso depende del esfuerzo normal efectivo y del valor medio de la distancia mínima entre partículas, la resistencia aumenta cuando dicho valor medio disminuye.

En los suelos finos compactados suelen desarrollarse presiones neutrales negativas, una vez que la compactación a sido terminada. estas presiones negativas dependen fundamentalmente del grado de saturación del suelo. Las presiones negativas desarrolladas en el agua son mayores a menor grado de saturación inicial y hacen que sea también mayor la resistencia del suelo compactado y menor su deformabilidad.

COMPORTAMIENTO EN PRUEBA RAPIDA (SIN CONSOLIDACION Y SIN DRENAJE)

Puesto que el grado de saturación influye mucho en las propiedades de los suelos compactados, la respuesta de una misma muestra en prueba triaxial rápida dependerá de si se la ensaya con el grado de saturación que adquiere cuando se compacta, o de si se satura a volumen constante antes de probarla. En el primer caso, la resistencia es función de la presión de confinamiento en la cámara, pues la compresibilidad del aire hace que la relación de vacíos varíe con tal presión; en el segundo caso, el comportamiento del suelo es independiente de la presión en la cámara.

Las muestras compactadas con contenidos de agua abajo del óptimo tiene más resistencia que las compactadas con contenidos de agua arriba de la humedad óptima. La resistencia de un suelo con contenido de agua arriba de la humedad óptima también depende un tanto del tipo de compactación, debido al diferencias en la estructura del suelo. Si se humedecen las muestras el cuadro cambia debido a la expansión, especialmente para contenidos de agua abajo de la humedad óptima. la figura 10 muestra las curvas de resistencia para una arcilla compactada por amasado, para tres diferentes energías de compactación. las curvas muestran la resistencia definida como el esfuerzo requerido para provocar 5 y 25% de deformación.

COMPORTAMIENTO EN PRUEBA RAPIDA CONSOLIDADA

Algunas investigaciones indican que para una misma humedad de compactación la resistencia aumenta con el peso volumétrico; a mayor peso volumétrico en la compactación, resultará mayor la resistencia después de la consolidación, al comenzar la aplicación del esfuerzo desviador, resultando así menores presiones neutrales.

A si mismo peso volumétrico de compactación, la resistencia crece con la humedad de compactación; cuanto más alta es la humedad de compactación, más compresible es el suelo y mayor el peso volumétrico que se obtiene después de la consolidación, inmediatamente antes de aplicar el esfuerzo desviador, lo que conduce a mayores resistencias.

COMPORTAMIENTO EN PRUEBA LENTA

A un contenido de agua de compactación, constante, la resistencia en prueba lenta crece con el peso volumétrico seco, por el menor espaciamento que logran las partículas. A peso volumétrico seco constante, la compresibilidad del suelo crece con el contenido de agua de compactación y por esta razón disminuye el espaciamento de las partículas en el instante de la falla.

RESISTENCIA A LA EROSION INTERNA

la resistencia de los suelos finos compactados a la tubificación y otros efectos de las fuerzas de filtración, depende de la trabazón entre sus partículas determinadas por la geometría de la estructura y por la magnitud de las fuerzas electromagnéticas entre partícula. La compactación de suelos del lado seco del óptimo produce bajo grado de orientación y alta permeabilidad. Si en tal caso ocurre flujo y se lava el suelo con agua con baja concentración de sales, aumentarán las fuerzas de repulsión entre partículas, favoreciéndose en arrastre de las mismas. Si la compactación se hace del lado de las humedades mayores que la óptima se tiene, por efectos contrarios, menor susceptibilidad a la tubificación.

VALOR RELATIVO DE SOPORTE (V.R.S)

la figura 11 muestra la variación del valor relativo de soporte de una arcilla limosa con las condiciones de compactación; el valor relativo de soporte depende tanto del contenido de agua como del peso volumétrico que se alcance. Para especímenes que se prueban después de ser saturados se obtiene una curva parecida a la de compactación, debido a la absorción de agua y expansión que sufre el espécimen durante la saturación. La figura muestra también la expansión que sufren los especímenes en función del contenido de agua con que se compactaron; se ve la conveniencia de compactar los suelos expansivos en el lado húmedo, independientemente de que en tal caso se llegue a un menor valor relativo de soporte.

EFFECTOS DE TIEMPO

Las investigaciones indican que el paso del tiempo afecta de manera significativa a la resistencia de las arcillas compactadas. La figura 12 muestra un ejemplo de este hecho. Una arcilla limosa con notables propiedades tixotrópicas se probó hasta la falla en compresión simple con velocidades de aplicación de la carga que variaron desde 5 minutos, hasta 10 días, en dos series de pruebas, en un caso realizadas inmediatamente después de la compactación y en el otro caso tras un periodo de almacenamiento de 18 días a humedad y peso volumétrico constantes. La resistencia se definió como el esfuerzo desviador requerido para causar al espécimen una deformación unitaria de 10%.

En los especímenes que se probaron inmediatamente después de la compactación se produjo una disminución ligera de la resistencia entre tiempos de carga de 5 y 100 minutos, de manera que la resistencia fue 30% mayor en una prueba de 10 días que en la prueba estándar que dura aproximadamente 10 minutos.

En los especímenes que se probaron después de 18 días de almacenamiento, la resistencia disminuyó algo con el tiempo de carga hasta un día y después aumentó ligeramente hasta 10 días, pero en este caso no se produjeron diferencias de más de 4% de la resistencia estándar.

El considerable aumento de resistencia para los especímenes en que se realizaron pruebas largas inmediatamente después de su compactación se debe sobre todo a efectos normales de tixotropía, que ocurren con rapidez y no se hace notar en las muestras que se almacenan.

En general un suelo compactado gana resistencia con el tiempo

III.2. SUELOS GRUESOS

Si, por ejemplo, en un aparato de corte directo se prueba una arena suelta para obtener su resistencia al esfuerzo cortante, se obtendrá una curva esfuerzo-deformación del tipo plástico, como la que se ilustra en la figura 13. Para producir deformaciones crecientes se necesitan esfuerzos tangenciales crecientes. En la misma prueba una arena muy compacta mostrará la curva esfuerzo-deformación con línea discontinua que aparece en la misma figura; al principio se necesita esfuerzo creciente para aumentar la deformación, pero una vez que se sobrepasa un valor máximo del esfuerzo, éste puede disminuir sin que la deformación deje de crecer (comportamiento frágil). Esta diferencia de comportamiento puede expresarse en términos de comportamiento; en arena compacta no solo es preciso vencer el rozamiento entre los granos, sino obligarlos a girar y moverse, rodando uno sobre otros; sin embargo, una vez que se ha roto la trabazón estructural compacta inicial, se facilita mucho su movimiento relativo. Por el contrario, en arena suelta, la estructuración inicial es floja e inestable y es fácil iniciar el movimiento relativo, pero éste va produciendo estructuras cada vez, más cerradas y la resistencia de la arena va creciendo en forma paulatina hasta un cierto límite. Esta estructura es prácticamente igual a la que se llega al compactar la arena, por lo que la resistencia final o residual es la misma en el caso suelto y en el compacto.

La parte inferior de la figura 13 muestra las variaciones de volumen que sufre la muestra durante la deformación. El volumen de las arenas sueltas disminuye desde un principio, a causa de la destrucción de las inestables estructuras iniciales. En las arenas compactas hay al principio una ligera disminución de volumen por el aumento del nivel general de esfuerzos, pero en seguida el proceso de deformación produce un aumento de volumen. En la figura se aprecia que la resistencia máxima que puede desarrollar una arena compacta es mucho mayor que la que puede ofrecer la misma arena, suelta. Naturalmente que no siempre son más favorables las características con que se presenta la resistencia en las arenas compactas, por ejemplo, en arena suelta se desarrolla siempre resistencia creciente, en tanto que la compacta exhibe una falla frágil, a partir de la cual su resistencia cae mucho, hecho que pudiera tener importancia en las aplicaciones; las arenas compactas son también susceptibles de falla progresiva.

La compresibilidad de las arenas compactadas también disminuye mucho respecto a la de las arenas sueltas.

IV. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE COMPACTACION

IV.1. POR PARTE DEL MATERIAL

NATURALEZA Y ORIGEN

Es claro que la clase de suelo con que se trabaja influye de manera decisiva en el proceso de compactación. Este hecho puede notarse observando las figuras 2 y 3 que muestran la influencia del tipo de material en la compactación.

CONTENIDO NATURAL DE AGUA VS CONTENIDO DE AGUA DE COMPACTACION

Esto se refiere al contenido natural de agua que el suelo poseía antes de añadirle o quitarle humedad para compactarlo, en busca del contenido óptimo o cualquier otro con que se hubiera decidido realizar la prueba.

En los procesos de campo el contenido de agua original no sólo ejerce gran influencia en la respuesta del suelo al equipo de compactación, sino que también gobierna en gran parte el comportamiento ulterior de la masa compactada. Aunque por lo general sólo pueden lograrse cambios relativamente pequeños al humedecer o secar el suelo extendido en la obra, es muy aconsejable buscar siempre condiciones de humedad natural que no se aparten mucho de la óptima para el proceso de compactación que vaya a usarse; lo que significa que el material ha de ser preparado de alguna manera antes de ser compactado.

En los procesos de laboratorio, el contenido natural de agua del suelo tiene especial influencia en las compactaciones que se logren con cierta energía, a humedades menores que la óptima, sobre todo cuando se procede a compactar el suelo inmediatamente después de la incorporación del agua. En un suelo originalmente bastante seco, el agua que se añada producirá mayor diferencia inmediata entre las condiciones de humedad interna y externa de los grumos, que en otro que originalmente hubiese estado más húmedo.

PORCENTAJE DE AGREGADOS GRUESO O FINO

La figura 2 muestra la influencia de este factor. Se observa que se tiene, en general, una menor eficiencia en la compactación a mayor porcentaje de finos para un suelo dado. también se observa en la figura la influencia de la graduación en la compactación del material. Entre mejor graduación se tenga del suelo más eficiente será la compactación.

COMPETENCIA DEL GRANO VS ENERGIA DE COMPACTACION

Un efecto que merece especial atención es la degradación estructural que sufren muchos suelos gruesos por el proceso de compactación, lo que se traduce en cambios importantes en la granulometría, de manera que la que se obtiene en el campo no es la

misma que se obtuvo en el laboratorio, que se traduciría en diferencias de los resultados de compactación en campo y en laboratorio.

IV.2. POR PARTE DEL PROCEDIMIENTO DE PREPARACION DEL MATERIAL

SECADO PREVIO Y PROCEDIMIENTO DE SECADO

En los laboratorios, es común presentar los resultados de las pruebas de compactación con base en gráficas $\gamma_d - \omega\%$ (peso volumétrico seco vs contenido de agua). Estas curvas son diferentes si las pruebas se efectúan a partir de un suelo relativamente seco al que se va agregando agua o si se parte de un suelo húmedo, que se va secando según avanza la prueba. Las investigaciones experimentales comprueban que en el primer caso se obtienen pesos específicos secos mayores que en el segundo, para un mismo suelo y con los mismos contenidos de agua; este efecto parece ser particularmente notable en los suelos finos plásticos con contenidos de agua inferiores al óptimo.

TAMAÑO MAXIMO DE PARTICULAS Y SUSTITUCION POR FRACCION EQUIVALENTE

El peso volumétrico aumenta al aumentar el porcentaje de gruesos hasta un cierto límite, arriba del cual disminuye. Si el porcentaje de gruesos es constante, pero se cambia la granulometría de la fracción gruesa el peso volumétrico aumenta al mejorar la distribución granulométrica de dicha fracción de gruesa. Por esta razón es inadecuado el procedimiento de compactación de laboratorio en que la fracción retenida en una malla se sustituye por el mismo peso del material que pasa por dicha malla y lo retiene la número 4; si tal método se aplica, se obtienen resultados que pudieran desviarse significativamente de lo que ocurra en el campo.

PROCEDIMIENTO DE INCORPORACION DE AGUA

La forma usual de expresar el contenido de agua, establece solamente la proporción que existe entre el peso de esta y el del suelo seco, pero no explica la forma como esa agua se encuentra distribuida en las partículas o en los grumos del suelo. Las diferencias en la distribución de la humedad ejercen un efecto muy importante en la curva $\gamma_d - \omega\%$, especialmente en los suelos finos. Algunos suelos tienden a formar grumos cuando se les incorpora agua; para disminuir este efecto se recomienda que, en este tipo de suelos, la incorporación de agua se haga con un aspersor.

TIEMPO PARA LA HOMOGENIZACION

Cuando el suelo está seco y se agrega agua, esta tiende a quedar en la periferia de los grumos, con propensión a penetrar en ellos solo después de algún tiempo. Si el lapso que se deja pasar entre la incorporación, es largo, se permite la incorporación uniforme del agua a los grumos del suelo, con la consecuente disminución de su humedad superficial y el aumento de las presiones capilares.

En los laboratorios es común que se proceda a partir de un suelo relativamente seco; se incorpora agua según avanza la prueba y se deja pasar el tiempo suficiente tras la incorporación (24 horas), para permitir la distribución uniforme del agua en el suelo y evitar que la humedad superficial de los grumos que pudiese contener el suelo sea diferente a la interna.

RECOMPACTACION O REUTILIZACION DEL MATERIAL

En muchos laboratorios es práctica común usar la misma muestra de suelo para la obtención de puntos sucesivos de las pruebas de compactación; ello implica la continuada recompactación del mismo suelo. Se ha visto que esta práctica es inconveniente en lo absoluto, toda vez que la experimentación ha demostrado, que si se trabaja con suelos recompactados los pesos volumétricos que se obtienen son mayores que los que se logran con muestras vírgenes en igualdad de circunstancias, de modo que con suelos recompactados la prueba puede llegar a dejar de ser representativa.

IV. 3 . POR EL PROCEDIMIENTO DE COMPACTACION

TAMAÑO DEL MOLDE

El tamaño del molde tiene influencia en el peso específico seco obtenido para energías de compactación comparables. Zeigler reporta los resultados de pruebas de compactación hechas en moldes de 4 y 6 pulgadas en mezclas de gravas. En el molde de 4 " se uso el método estándar de compactación, utilizando un pistón de 5.5 lb y 25 golpes por cada una de las tres capas (altura del molde = 12 "), usando un tamaño máximo de compactación similar, aplicando 74 golpes por cada una de las tres capas empleadas (altura del molde = 12 ") y un pistón de 5.5. lb. Se obtuvieron diferencias entre los resultados obtenidos de los moldes utilizados, las que variaron aproximadamente con la relación área de fricción- área de la sección transversal; en el caso del molde de 4 " esta relación (4.58) fue más grande que para el molde de 6 " (3.05). Se llego a la conclusión de que el molde de 6 " fue más representativo de las condiciones de compactación en el campo.

FORMA DEL MOLDE

Se entiende que la energía de compactación deba ser repartida de manera uniforme en todo el volumen del suelo, es por eso que si se utilizan moldes de diferente forma puede haber diferencias en los resultados, debidas a diferencias en la distribución de la energía de compactación.

FRECUENCIA EN LA APLICACION DE CARGAS

Las figuras 15 y 16 muestran la influencia de la frecuencia de operación de un equipo compactador en varios tipos de suelos. Se observa que hay una frecuencia en donde el suelo alcanza su máxima densidad, por lo tanto la frecuencia en la aplicación de las cargas es un factor importante que hay que tomar en cuenta.

REFERENCIAS

- 1.- D. Holtz, R, D, Kovacs, W. " An introduction to Geotechnical Engineering". Prentice Hall.
- 2.- Juárez Badillo E. , Rico Rodríguez A. " Mecánica de Suelos ", tomo I. Ed. LIMUSA.
- 3.- Rico Rodríguez A., Del Castillo Mejía H. " La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres ", Volumen I. Ed. LIMUSA.

TABLAS Y FIGURAS

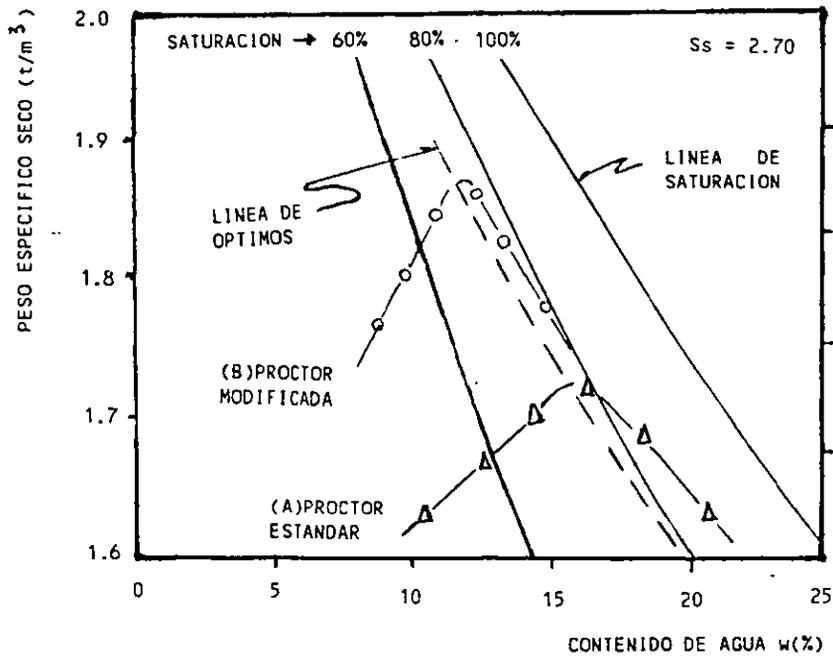


FIG 1 CURVAS DE COMPACTACION PROCTOR ESTANDAR Y PROCTOR MODIFICADA.

ESTRUCTURA Y PLASTICIDAD

| # | DESCRIPCION | ARENA | LIMO | ARCILLA | LL | IP |
|---|------------------------------|-------|------|---------|----|----|
| 1 | ARENA LIMOSA BIEN GRADUADA | 88 | 10 | 2 | 16 | 0 |
| 2 | ARENA ALUVIAL BIEN GRADUADA | 72 | 15 | 13 | 16 | 0 |
| 3 | ARENA ALUVIAL MAL GRADUADA | 73 | 9 | 18 | 22 | 4 |
| 4 | ARCILLA ARENOLIMOSA (INORG.) | 32 | 33 | 35 | 28 | 9 |
| 5 | ARCILLA LIMOSA (INORGANICA) | 5 | 64 | 31 | 36 | 15 |
| 6 | LIMO LOESIAL | 5 | 85 | 10 | 26 | 2 |
| 7 | ARCILLA FIRME | 6 | 22 | 72 | 67 | 40 |
| 8 | ARENA MAL GRADUADA | 94 | 6 | 6 | 0 | - |

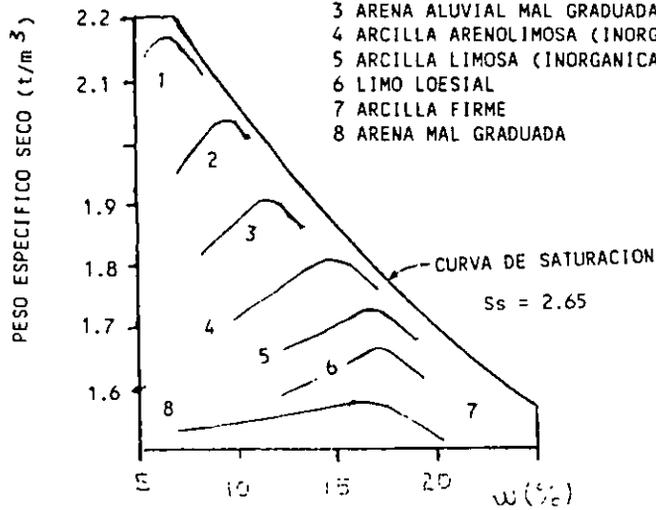


FIG 2 CURVAS CONTENIDO DE AGUA-PESO ESP. SECO, PARA 8 SUELOS COMPACTADOS MEDIANTE LA PRUEBA PROCTOR ESTANDAR.

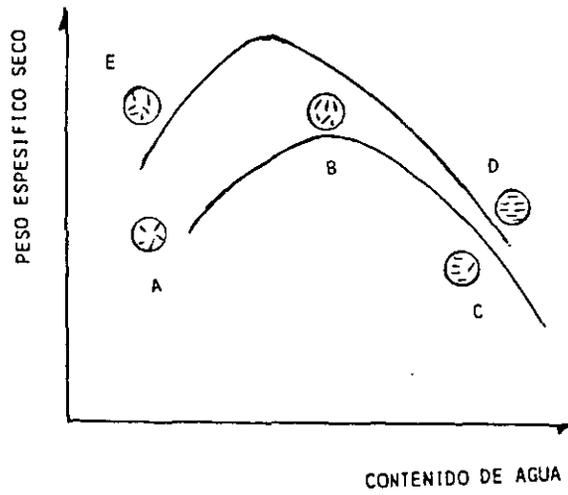
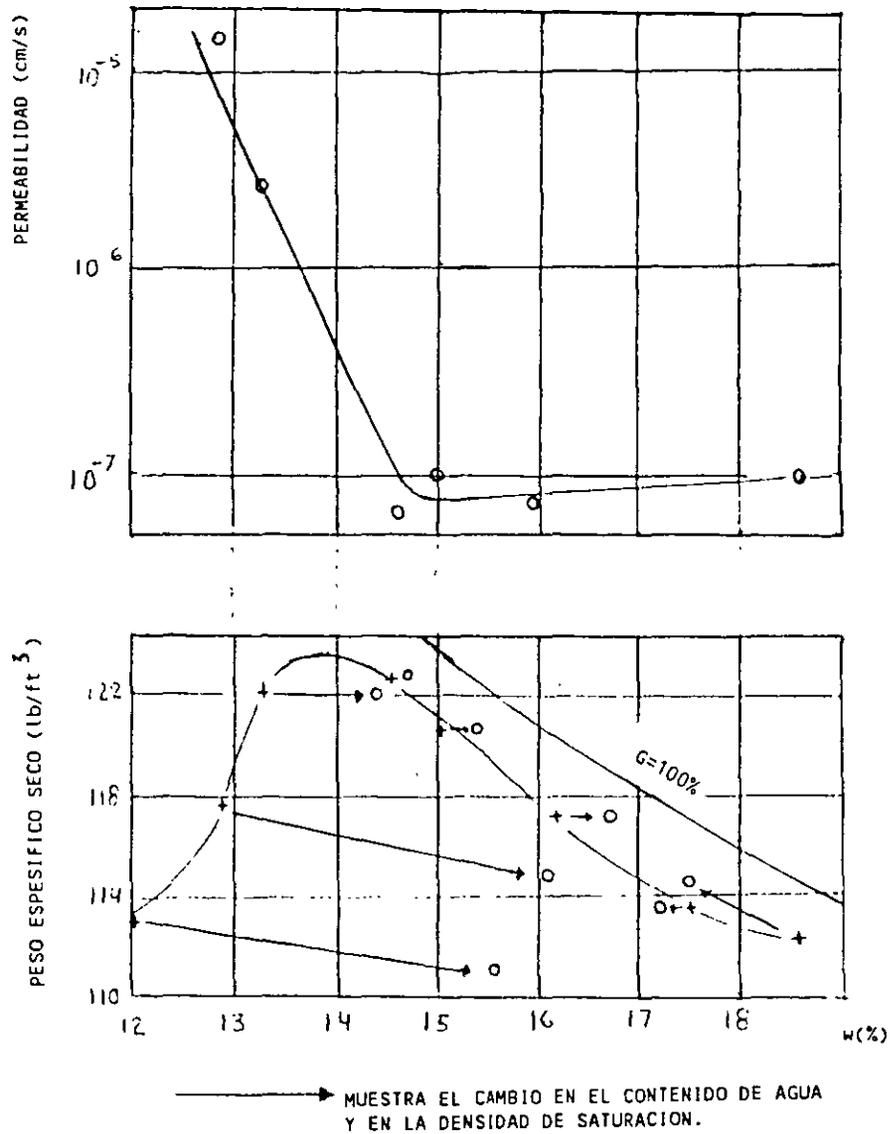
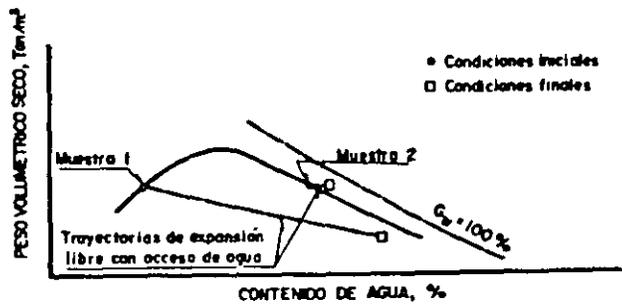


FIG 4 EFECTO DE LA COMPACTACION EN LA ESTRUCTURA DEL SUELO

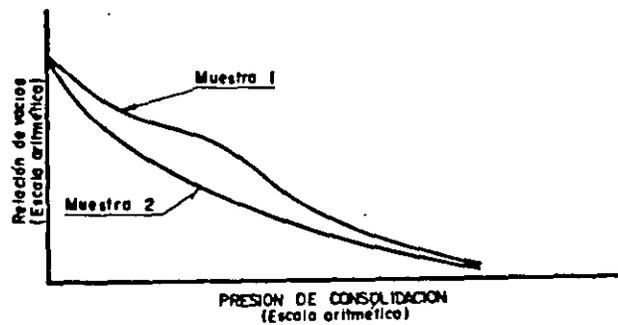


LAS PRUEBAS DE PERMEABILIDAD Y COMPACTACION
 ESTAN HECHAS EN ARCILLA ARENOSA DE JAMAICA.

FIG 5 CAMBIO EN LA PERMEABILIDAD AL VARIAR EL CONTENIDO
 DE AGUA DE LA MUESTRA EN EL MOLDE.



a) Condiciones de compactación y trayectorias de expansión libre



b) Curvas relación de vacíos-presión

Figura 7 Compresibilidad y expansividad de un suelo arcilloso compactado a una misma relación de vacíos con contenidos de agua a ambos lados óptimo

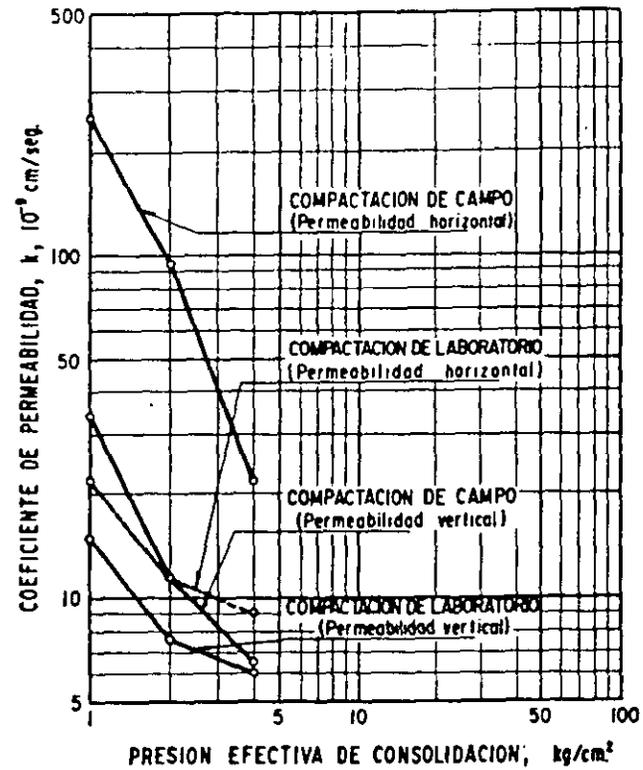


Figura 6 Diferencias de permeabilidad vertical y horizontal en muestras compactadas en el campo y en el laboratorio

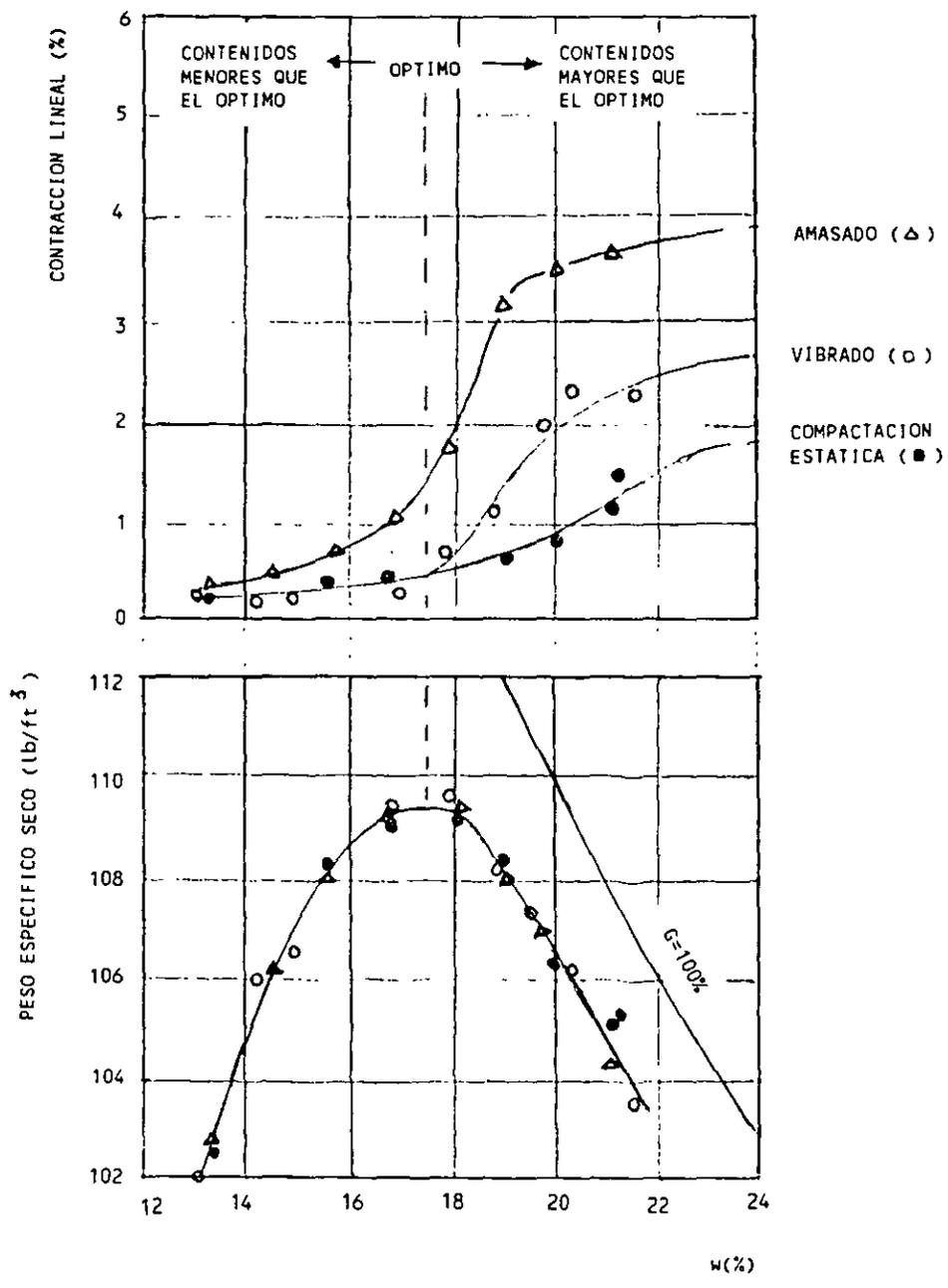


FIG 8 LA CONTRACION ES FUNCION DEL CONTENIDO DE AGUA Y EL TIPO DE COMPACTACION.

PRUEBA NO CONSOLIDADA NO DRENADA
 PRESION DE CONFINAMIENTO = 10 kg/cm²

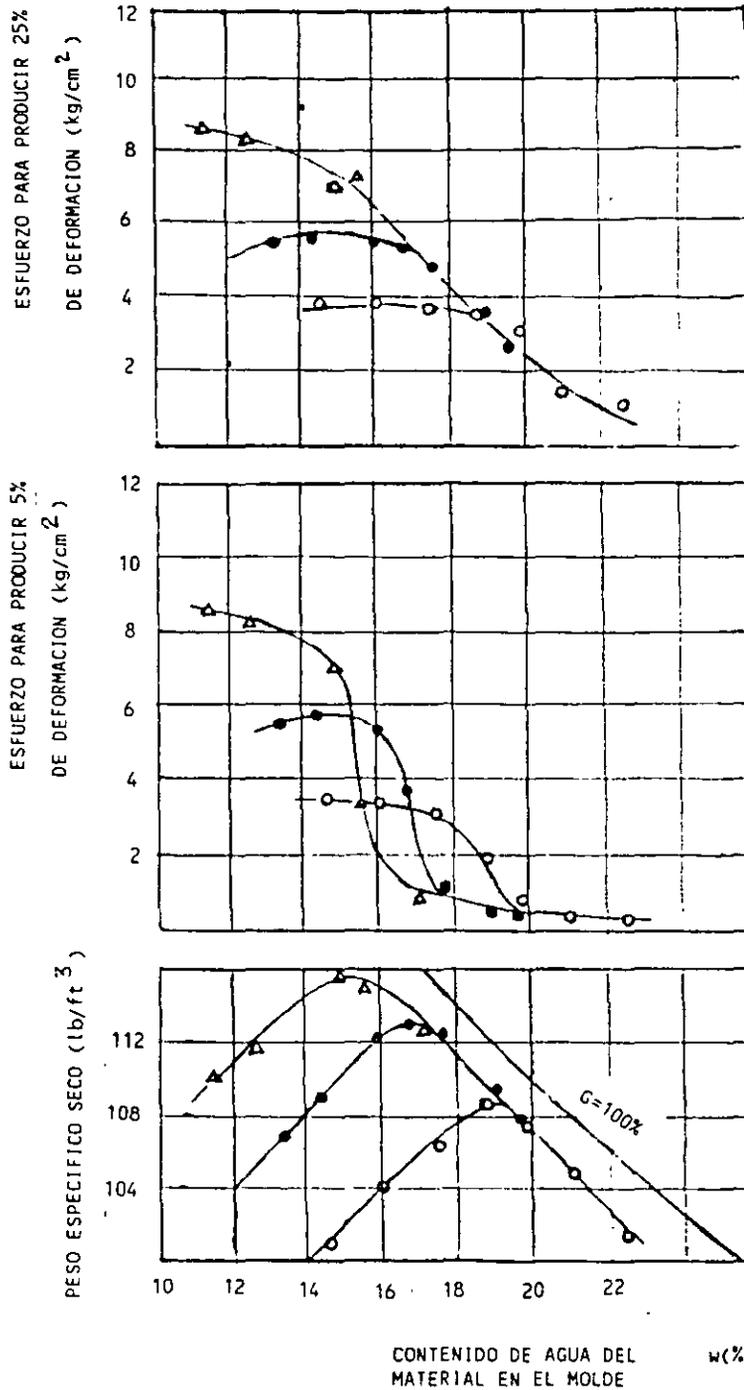


FIG 10 RESISTENCIA EN FUNCION DEL ESFUERZO DE COMPACTACION Y DEL CONTENIDO DE AGUA DEL MATERIAL EN EL MOLDE.

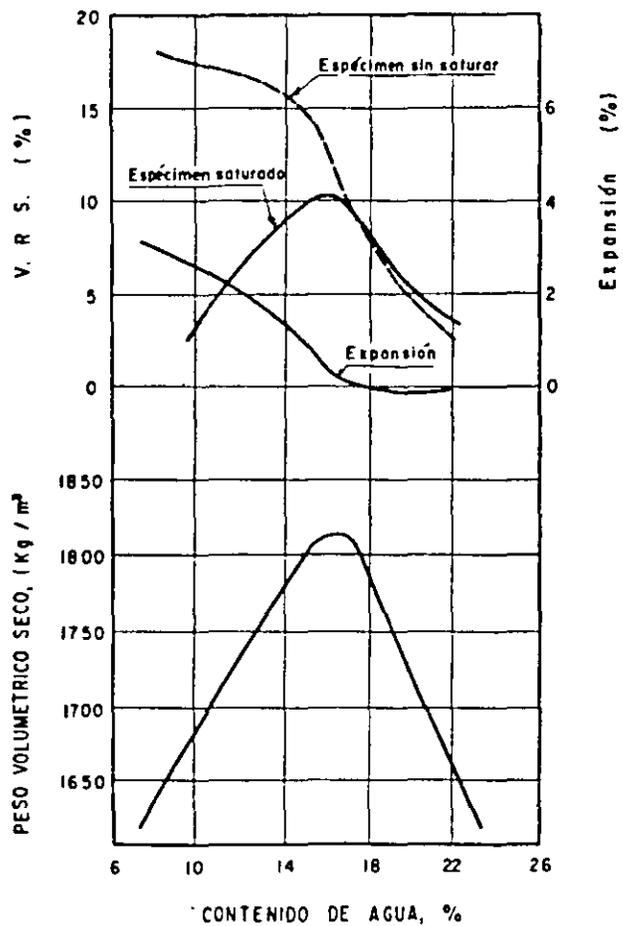


Figura 11 Variación del V. R. S. de una arcilla limosa con la compactación

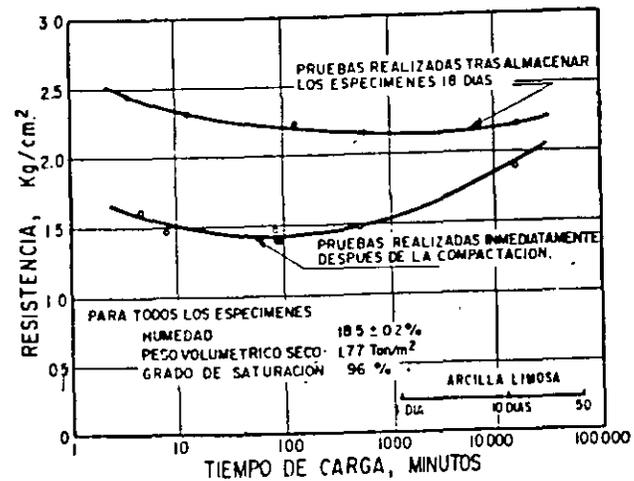


Figura 12 Efectos de tiempo en la resistencia de una arcilla limosa con alto grado de saturación

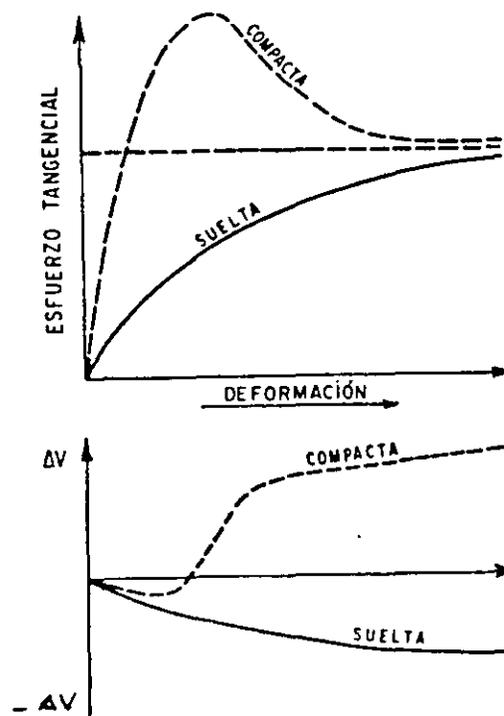


Figura 13 Diferencias de comportamiento entre una suelta y una compacta

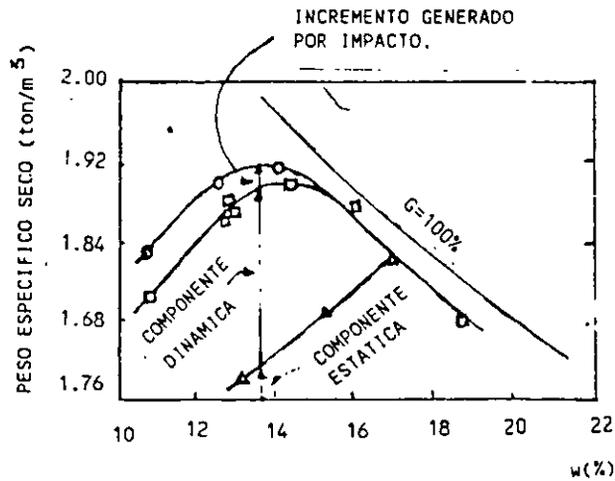


FIG 15 RESULTADOS DE LA COMPACTACION DE ARENA LIMOSA EN CAPAS DE 30 cm, CON Y SIN VIBRACION USANDO UN RODILLO VIBRATORIO REMOLCADO DE 7700 kg.

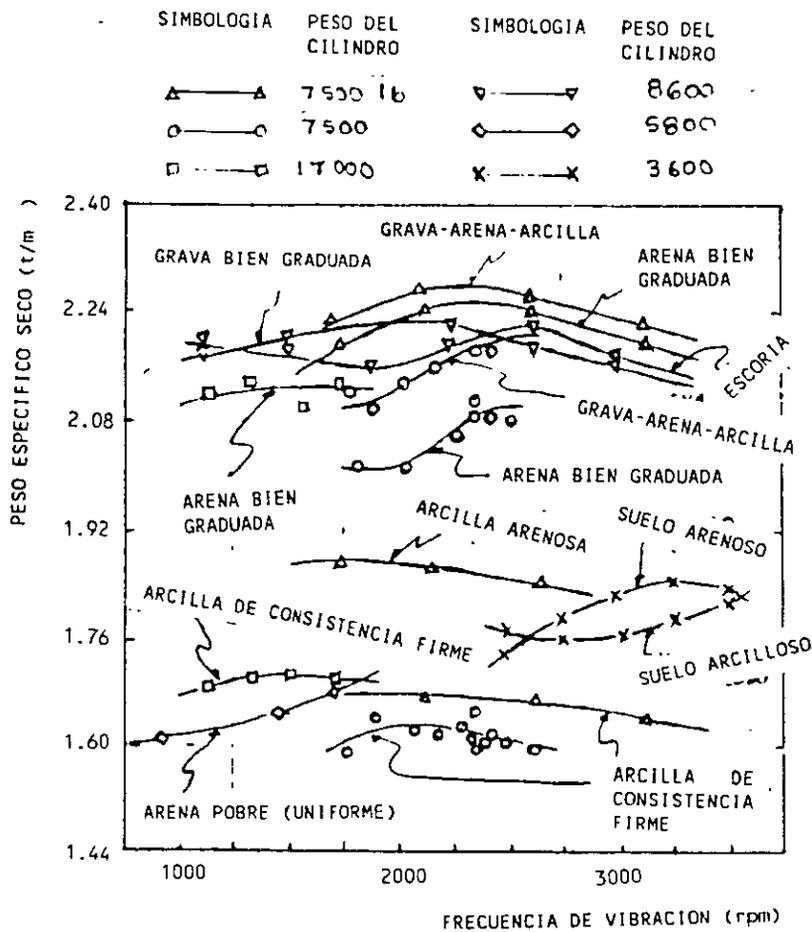
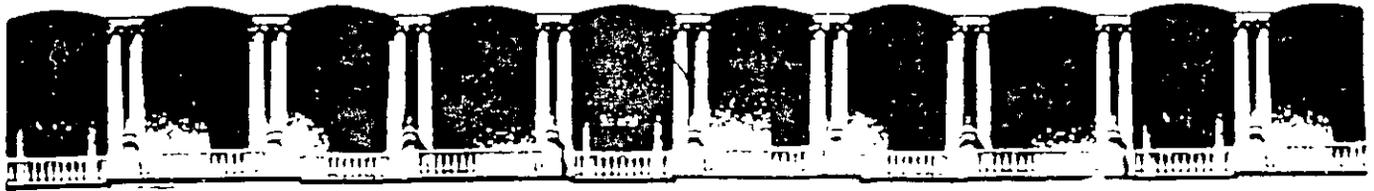


FIG 16 VARIACION DE LA COMPACTACION AL CAMBIAR LA FRECUENCIA DE VIBRACION USANDO UN RODILLO LISO VIBRATORIO.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS I

TEMA

**CONDICIONES QUE INFLUYEN EN LOS RESULTADOS
DE LAS PRUEBAS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS**

**CONFERENCISTA
M. en I. MANUEL MENDOZA LÓPEZ
PALACIO DE MINERÍA
MAYO 2000**

CONDICIONES QUE INFLUYEN EN LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE COMPACTACION DE SUELOS.

Manuel J Mendoza L.
Instituto de Ingeniería U.N. A. M.

RESUMEN Se analizan las diversas condiciones experimentales que influyen en los resultados de los ensayos de compactación en el laboratorio. Se trata primordialmente lo referente a los suelos cohesivos, enfatizando la objetividad y representatividad de las pruebas de laboratorio en relación a la compactación de campo. Se presentan resultados de propiedades mecánicas de suelos cohesivos compactados que se ven modificados por el procedimiento de compactación.

1. INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

Las vías terrestres, como cualquier otra obra térrea que construye el hombre como infraestructura para su servicio y bienestar, deben mostrar un comportamiento mecánico acorde a las necesidades para las que fueron construidas. Para proporcionarles a los suelos que constituyen esas obras las características deseables, siempre surge la compactación como el medio de estabilización y mejoramiento más adecuado y barato.

La compactación es posiblemente la actividad geotécnica más antigua que ha realizado el hombre; en el principio, mediante su propio paso o el de los animales en brechas y bordos. Sin embargo, no fue sino hasta la década de 1930, con los artículos publicados por Proctor, cuando se establecieron de manera consiente las bases experimentales de la relación peso volumétrico seco, γ_d - contenido de agua de compactación, w_c - energía de compactación, E_c . De ese entonces a la fecha se han realizado numerosos estudios de campo y laboratorio con suelos compactados, cuya naturaleza trifásica determina su comportamiento mecánico complejo; la interacción entre fases en los suelos cohesivos compactados se complica todavía más por el tamaño y mineralogía de sus partículas. La mayoría de esos estudios han aportado conocimientos acerca del *qué*, estableciendo relaciones fenomenológicas entre las propiedades tales como la resistencia cortante, compresibilidad y permeabilidad y por la otra, la relación $\gamma_d - w_c - E_c$. Asimismo se ha avanzado primordialmente en el *cómo*, desarrollándose equipo de construcción con gran diferencia en peso, mecanismo de compactación, tracción e incluso grados de automatización y control de la operación; por su parte, el equipo de laboratorio se ha mecanizado y se han desarrollado medios para compactar por amasado y vibración acciones éstas más apegadas a la operación de campo con ciertos equipos y materiales. La complejidad de estos suelos aunada a su diversidad y variabilidad en la naturaleza, son los motivos por los que son reducidos los estudios que explican los *por qué*. Las investigaciones a nivel microscópico podrían eventualmente dar respuestas explicativas en el futuro mediano, con base en la observación de la estructura e interacción de sus componentes bajo esfuerzos externos.

La situación anterior ha llevado a una práctica cotidiana de la compactación con cierta componente empírica, perdiéndose en ocasiones el concepto de la compactación como medio

para alcanzar ciertas propiedades ingenieriles deseadas, por el erróneo de la compactación por sí misma.

1.2 Objetivos

Se analizan en este trabajo las diversas condiciones que influyen en los resultados de los ensayos de compactación en el laboratorio. Tales pruebas se tratan ya sea como el medio para establecer las propiedades deseadas de cierto suelo y sus parámetros de diseño para un problema dado, o bien como la operación para ejercer el control de calidad de cierta obra, se enfatiza el primer aspecto, revisando lo relativo a la representatividad de los ensayos de laboratorio.

La mayor parte de este trabajo se refiere a los materiales térreos compactables, de acuerdo con la norma mexicana (Ref. 1), y de éstos los que poseen un porcentaje apreciable de suelos finos, lo que les proporciona un comportamiento cohesivo. Tales suelos podrán presentarse en el cuerpo de terracerías o bien en la capa sub-rasante de vías terrestres.

2. REPRESENTATIVIDAD DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

2.1 Principio de representatividad

Un principio básico general de los ensayos de laboratorio es que el material de prueba sea lo mas semejante en características mecánicas al material del prototipo y que además, se vea sometido a equivalentes acciones externas tales como esfuerzo aplicado o gradiente hidráulico de la obra real. En lo que se refiere a la compactación de suelos, esta representatividad se ha intentado dar por impactos o presión estática, primero, y por amasado o vibración, o bien con alguna combinación de estos procedimientos, en años más recientes.

2.2 Tipos de compactación y su representatividad

El procedimiento de impactos sistematizado por Proctor vio pronto la aparición del procedimiento de presión estática propuesto por Porter, iniciándose así una discusión que todavía persiste entre quienes defienden la técnica de impactos que permite definir con facilidad la energía de compactación y aquéllos que consideran que la aplicación de presión estática es más simple y rápida, y por tanto, un ensaye más conveniente.

La mayor parte de los estudios (Ref. 2 y 3) realizados al respecto, se han enfocado a la comparación de los pesos volumétricos secos máximos y de los contenidos óptimos de agua de distintos suelos, en ambas pruebas de compactación en el laboratorio. De esta manera se ha podido verificar que los valores de γ_d, \max resultantes de los ensayos Proctor SOP y Porter SOP son comparables y parece existir una relación confiable entre ellos. En general se puede señalar que un suelo cuyo producto " $Ip \cdot (\% < 200)$ " es mas alto, se compacta más eficientemente por medios estáticos que por impactos y viceversa.

Sin embargo la discusión de estos tipos de compactación con base sólo en el γ_d, \max que alcanzan en cada una de ellas, excluye a las propiedades mecánicas generadas por uno y por otro tipo de densificación. Unos resultados que muestran la importancia de esta consideración son los representados en la Ref. 4 y que se resume en la tabla I. Al compactar 15 especímenes de cada suelo y con cada tipo de compactación, en los que se reprodujeron el mismo peso volumétrico seco y semejante contenido de agua, se obtuvo que los valores

relativos de soporte en condiciones saturadas de los especímenes compactados estáticamente, fueron prácticamente del doble de los densificados por impactos.

La consideración de la cabal representatividad de un ensaye de compactación de laboratorio, es de particular importancia para especificar racionalmente la compactación de campo; no así para el control de calidad de la misma, para cuya realización se pueden emplear incluso otras técnicas indirectas.

Tabla I. Comparación de los valores relativos de soporte para suelos compactados estáticamente y por impactos (Ref. 4)

| Suelo | W _L % | I _p | % que pasa Malla 200 | V R S | | | |
|-------|---------------------|----------------|----------------------------|----------|-----|-------------|-----|
| | | | | IMPACTOS | | P. ESTÁTICA | |
| | | | | X | CV | X | CV |
| 1 | 38 | 18 | 29 | 11.1 | 7.6 | 21.8 | 4.2 |
| 2 | 43 | 20 | 74 | 12.4 | 5.6 | 22.1 | 1.8 |
| 3 | 40 | 20 | 90 | 11.7 | 6.5 | 22.5 | 1.9 |

\bar{X} = valor promedio

CV = coeficiente de variación

Por otra parte, al compactarse entre sí dos tipos de compactación de laboratorio y al no establecer ninguna relación con los resultados de la compactación de campo, se desvirtúa o no se atiende al principio de que " las pruebas de laboratorio sólo se justifican en términos de representatividad de los procesos de campo que producen ", Ref. 5 ; así pues, persiste la pregunta acerca de cuál tipo de compactación de laboratorio representa más fielmente la compactación que ejercen los equipos modernos de compactación en el campo.

La representatividad de las pruebas de impacto se ha puesto en duda, ya que la acción dinámica del impacto, las paredes rígidas del molde ejercen cierto confinamiento lateral de las partículas, lo cual no ocurre en el campo por el reducido confinamiento superficial.

Por otra parte, la compactación estática basa su densificación primordialmente en el acercamiento relativo y uniforme de los granos, grumos o partículas en la dirección de la compresión, con mínimo desplazamiento lateral. Por el bajo confinamiento antes citado, sobre todo en las primeras pasadas de un equipo de compactación en el campo, los componentes del suelo sufren desplazamientos laterales de importancia, ya que como se explica en el mecanismo de indentación de Prandtl del cual se derivó la solución de Terzaghi al problema de capacidad de carga, la penetración origina desplazamiento de las porciones contiguas laterales.

Las consideraciones simples antes expuestas no apoyan a la compactación por presión estática y al parecer su permanencia de uso, sólo se justifica por la sencillez de su realización y la costumbre establecida; la objetividad de su estandarización para definir el óptimo podría incluso objetarse.

Para el caso de los suelos cohesivos se ha reconocido el hecho de que la compactación por amasado en el laboratorio reproduce más fielmente la estructura de un suelo densificado con rodillos pata de cabra o rodillos neumáticos. En efecto, en un estudio efectuado por el cuerpo de Ingenieros (E.U.A) y reportado en una cuidadosa investigación de la Universidad de Harvard (Ref. 6) se hicieron comparaciones de diversos procedimientos de laboratorio con la compactación en el prototipo. La compactación a plena escala se efectuó tanto con rodillos pata de cabra (33 Kg / cm² , 8 pasadas , capas de 20 cm) como con rodillos neumáticos (11, 350 kg por eje, 4 pasadas, capas de 30 cm). La curva de compactación de campo se muestra en la fig. 1; en ésta también se incluyen los resultados de las compactaciones Proctor estándar por impactos y Harvard miniatura por amasado. Pudo comprobarse que la compactación por amasado con 30 pisonadas de 9 Kg cada una, a cada una de las 10 capas con que se forma el pequeño espécimen cilíndrico (h= 71.6 mm, d = 33.3 mm) arroja una curva de compactación prácticamente igual a la de campo. Esta comparación también adolece de considerar sólo los γ_d , aunque en este caso al menos se cubre toda la curva de compactación y no solo el $\gamma_{d,max}$; la verificación se realizó años más tarde (Ref. 7), al comparar las características esfuerzo-deformación de materiales de la presa Canyon en condiciones intactas y remoldeadas- recompactadas.

2.3 Compactación por amasado

Con excepción del procedimiento de Hveem, la técnica de amasado ha tenido un campo de aplicación limitado en la tecnología de vías terrestres. Por lo antes señalado, se estima conveniente revisar algunos motivos de tal exclusión, así como proponer algunos elementos que faciliten su empleo.

La mayor limitación del procedimiento de amasado Harvard miniatura (Ref. 8) el referente a su tamaño muy pequeño, lo que determina que solo sea útil para suelos finos francos con porcentajes reducidos de tamaño no mayores a la abertura de la malla 4; como se verá más adelante, aun con esos tamaños de granos o grumos se pueden tener efectos de escala y de pared. Para los materiales compactables de sub-rasante con los tamaños que pueden alcanzar los 7.5 cm, el molde de 3.33 cm de diámetro es imposible de usar. Existen otros equipos disponibles en el mercado extranjero que permiten compactar por amasado especímenes de tamaños mayores, aunque no como para incluir las gravas de 7.5 cm; su mecanismo es complicado y de costo alto.

En investigaciones recientes (Ref. 9) realizadas en el Instituto de Ingeniería , UNAM , se ha desarrollado un compactador neumo-mecánico que permite densificar por amasado especímenes de hasta 15 cm de diámetro, de manera sencilla y mediante un equipo simple, fig. 2; de esta manera se pueden incluir las gravas hasta de 2 cm.

El principio de operación es el mostrado en la figura 3, en donde se indica que la presión neumática constante actúa sobre un diafragma ahulado (bell-o-fram), el que le ejerce al pistón una fuerza igual al producto de su área por la presión; dicha fuerza se aplica al suelo cuando éste reacciona al compactarlo. Dependiendo del tamaño del molde por preparar, fig. 4, el compactador puede accionarse manualmente o se puede montar en una prensa de cremallera, lo que permite ejercer fuerzas relativamente altas con un moderado esfuerzo del operador.

En la figura 5 se muestra la aplicación sucesiva de pisonadas de los compactadores neumáticos, en comparación con uno de resorte tipo Harvard-Wilson; en las ordenadas se indica la fuerza registrada por una celda instrumentada dispuesta bajo el molde de compactación y en las abcisas , el tiempo transcurrido. Puede notarse que la carga se aplica más uniformemente con los compactadores neumáticos que con el de resorte. Nótese también, Figura 5a, que el neumático mantiene la carga máxima una fricción mayor de tiempo que le de resorte, Figura 5c, el primero determina formas trapeziales, mientras que el último, son triangulares.

2.4 Compactación por vibración.

El autor no posee resultados de ensayos de compactación por medios vibratorios. Para no haber una norma al respecto en SCT, en el que existen sin duda capas como la base de un camino o la de un balastro en una vía férrea constituidas por suelo granular, en cuanto una prueba en laboratorio con medios vibratorios resultaría la más representativa.

3. SUELOS ENSAYADOS

Se proporciona en la tabla II una breve descripción de los suelos en estudio (Ref. 10), de los que se presentan algunos resultados en incisos posteriores. el material ensayado fue secado previamente al ambiente , homogeneizado y almacenado; a esta condición le corresponde el W_i de partida para cada ensaye.

4. MOLDES, GRANULOMETRIA DE AGREGADOS Y PISONES

4.1 Forma de los moldes

Atendiendo al enfoque de que no sólo son convenientes las determinaciones de γ_d y w_c , el uso de un molde cilíndrico de compactación con proporción conveniente de diámetro a altura, es muy recomendable para poder ensayar el espécimen integral en alguna prueba que defina su comportamiento esfuerzo-deformación, de esta manera se evita el labrado de especímenes. en los ensayos de laboratorio efectuados en el II-UNAM se ha empleado para suelos finos un molde de 3.6 x 8.5 cm, en el que se pueden compactar especímenes por impactos, amasado o presión estática, para someterlos después a compresión no confinada o triaxial.

Tabla II. identificación de los Suelos Ensayados

| Clasificación y suelo | Descripción y Origen | Proporciones en la Composición Mineralógica | Contenidos de agua, en % | C.Proctor Estandar Yd,max (g/cm ³) W _{opt} (%) |
|-----------------------|---|--|--|---|
| SM - San Vicente | Material arenoso-limoso proveniente de lomeríos suaves formados por tobas volcánicas y localizados al oriente del D.F sobre la carretera México-Texcoco | Mayor: Feldespato Media: Montmorilonita y haloisita Trazas: Cristobalita y anfibolita | W _n = 30.0 W _i = 14.2 W _L = 32.9 I _p = 6.5 | 1.44 28.2 |
| SC - Chicoasén | Material areno-arcilloso proveniente del préstamo " La Costilla " usado para el núcleo impermeable de la presa Chicoasén. Se trata de lutitas alteradas y redepositadas | Mayor: Cuarzo Media: Clorita Trazas: Mica, montmorilonita, feldespatos y calcita. | W _n = 10.0 W _i = 4.2 W _L = 30.7 I _p = 10.2 | 2.00 12.7 |
| MH - Necaxa | Material limo-arcilloso residual proveniente de la descomposición de basalto en la ladera derecha de la presa Necaxa, Pue. | Mayor: Metahaloisita y haloisita hidratada. Media: Hematita, cuarzo Trazas: Magnetita, Ilmenita. | W _n = 51.6 W _i = 7.2 W _L = 74.0 I _p = 23.7 | 1.24 41.0 |
| CH - La Peña | Material arcilloso proveniente de un deposito aluvial cercano a la boquilla de la presa La Peña, Hgo. | Mayor: Montmorilonita Media: Feldespatos Trazas: Crisobalita, Cuarzo | W _n = 21.6 W _i = 19.4 W _L = 69.4 I _p = 38.3 | 1.37 34.5 |

W_n = Contenido natural de agua (*in situ*)

W_i = Contenido inicial de agua (antes de añadirle agua para la compactación)

4.2 Granulometría previa a la preparación para la compactación.

Con frecuencia se procede a secar el material proveniente de un banco de préstamo, antes de agregarle agua para su posterior compactación. El secado previo genera un alto porcentaje de grumos y asociaciones de partículas, sobre todo en materiales francamente arcillosos. De esta manera, la fracción gruesa de los suelos por compactar puede estar constituida por grumos, aun cuando sus partículas constituyentes sean menores de la abertura de la malla 200. Terzaghi hizo notar (Ref. 11) hace tiempo la importancia de estos grumos en el comportamiento de los suelos cohesivos; señalo que las partículas por sí mismas no son

necesariamente las determinantes de las propiedades del material, sino más bien las asociaciones de ellas formando agregados o paquetes.

En la tabla III se incluyen para cada suelo en estudio tanto la granulometría de las partículas a partir de W_n , determinada por hidrómetro (vía húmeda), como la granulometría del suelo con W_i y agrumado inmediatamente antes de la preparación para la compactación, obtenida por mallas (vía seca). Con excepción de la arena cuarzosa SP-San Roque, los materiales restantes acusan el efecto del secado.

En el inciso siguiente se mostrarán resultados que apoyan las apreciaciones de terzagui, así como otros a los que contribuye el tamaño de molde.

4.3 Efecto del tamaño de los granos y los grumos

Se ha observado (Ref. 9) que en mezclas de gravas o arena con fracción fina de suelos se modifican apreciablemente los valores de γ_d y W_C ; ello trae como consecuencia variación en las propiedades mecánicas. En la Fig 6 se muestra que en la medida que se aumenta el porcentaje de gruesos constituidos por granos duros, aumenta el γ_d y se reduce el W_C , al no tener confinamiento, es explicable que en ese mismo sentido se reduzca la resistencia q_u .

Tabla III. Granulometría de partículas (1) y del suelo por compactar (2)
(Se indica el porcentaje que pasa en peso)

| Malla No. | SM-San Vicente | | SC- Chicoasén | | MH-Necaxa | | CH-La Peña | | SP-San Roque | |
|-----------|----------------|-----|---------------|-----|-----------|-----|------------|-----|--------------|-----|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 4 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 10 | 91 | 88 | 74 | 60 | 100 | 72 | 100 | 65 | 65 | 65 |
| 20 | 76 | 73 | 44 | 24 | 100 | 44 | 100 | 41 | 24 | 24 |
| 40 | 57 | 53 | 32 | 12 | 100 | 19 | 99 | 23 | 8 | 8 |
| 60 | 46 | 41 | 29 | 8 | 100 | 9 | 98 | 14 | 4 | 4 |
| 100 | 36 | 30 | 27 | 6 | 100 | 6 | 95 | 7 | 1 | 1 |
| 200 | 25 | 17 | 26 | 4 | 98 | 2.5 | 90 | 4 | 0 | 0 |
| <2 μ | 4.5 | - | 7.3 | - | 46 | - | 46 | - | 0 | 0 |

Los resultados anteriores muestran las posibles discrepancias que se pueden obtener en los pesos volumétricos secos y el contenido de agua, cuando se sustituye la fracción mas gruesa de cierto tamaño, por un peso equivalente de una fracción de tamaños menores. Esta practica es frecuente en México y sigue los lineamientos de los métodos C y D de la norma AASHTO.

Por otra parte, es común disgregar el material con un pisón de madera cubierto con hule, antes de iniciar algún ensaye en el laboratorio (Ref. 12); derivado de esta acción se incluye entonces un suelo con cierta granulometría de grumos, determinada por la intensidad de disgregación. Se muestra enseguida el efecto que tiene el ensaye de diferentes granulométrías de grumos, no de granos, ya que se trata de los suelos francamente finos MH-Necaxa y CH - La Peña.

Las granulometrías iniciales fueron:

- a) Integral de grumos como usualmente se compacta (Caso 2 de la Tabla III)
- b) Grumos finos (Pasan la malla 100, es seco)
- c) Grumos gruesos (pasan la malla 4 y se detienen en la malla 8)

En ambos suelos y empleando tanto compactación por impactos como amasado, los resultados acusan una moderada diferencia en el γ_d , principalmente en la rama seca, como se aprecia en las figuras 7 a 9. Sin embargo, La resistencia a la compresión no confinada exige una diferencia superior, tanto mayor confuso se esta más del lado seco, llegando a guardar la resistencia q_u una relación de 3 a 1. La resistencia es máxima para los grumos finos, intermedia para la integral y mínima para grumos gruesos; esto se explica por la mayor cuantía de debilidades que tienen los grumos conforme son más grandes.

Puede apreciarse en la figura 7 y 8 que en el suelo MH-Necaxa, las diferencias en q_u fueron menores que en las muestras compactadas por amasado que en las de impacto, lo que permite asegurar que ese procedimiento destruye más grumos.

4.4 Efectos de pared y escala

La ocurrencia de una capa superficial más porosa se ha observado (Ref. 13) en especímenes cilíndricos de suelos granulares; éste hecho está relacionado con la presencia de una pared rígida y es tanto más importante cuanto menor es la proporción de diámetro del molde al tamaño máximo de granos. Se mostrará enseguida que este efecto de pared también ocurre en suelos cohesivos compactados, siempre que éstos se ensayen agrumados inicialmente. Se compararon nuevamente los suelos MH - Necaxa y Ch - La Peña, a los que toda vez se les dosificó para asegurar la misma granulometría de partida; el tamaño máximo de los grumos en el primero fue de 4.76 mm y el segundo de 9.52 mm. Los moldes empleados fueron de 36.0, 79.1, y 126.8 mm de diámetro con una proporción de altura a diámetro de 2.36, a fin de evitar el efecto de esbeltez reducida.

En la figura 10 se muestran las curvas de compactación correspondientes a diferentes proporciones D / T_{max} . el efecto de pared se precia en la rama seca del suelo CH - La Peña, en tanto que en el suelo MH - Necaxa para un cociente D / T_{max} mayor a 7.6, el efecto de pared desaparece. De los resultados anteriores se concluye que como en los ensayos con suelos granulares, debe respetarse en suelos cohesivos compactados una relación D / T_{max} de por lo menos 7.

Un efecto que por el contrario al de pared, afecta más a los especímenes cada vez más grandes, es el de escala, ya que así como aumentan, también es mayor la probabilidad de la ocurrencia de defectos y debilidades que faciliten la falla. Como se demostró en la fig. 10 el suelo MH - Necaxa no mostró efecto de pared en el intervalo estudiado; por el contrario, en la figura 11 se distingue que el efecto de escala es notable ya que la resistencia q_u se reduce en un 20 % al aumentar el tamaño del espécimen. Por los resultados anteriores se sugiere que se usen moldes y granulometría de grumos tales que la relación D / T_{max} sea de por lo menos 10, para no sobrestimar la resistencia en el laboratorio por los efectos de escala.

4.5 Sobre la homogeneidad de especímenes.

Para la determinación de propiedades mecánicas es importante contar con especímenes compactados homogéneos, a fin de evitar efectos tales como pandeo, modos inusuales de falla o planos de corte inducidos (Ref. 14), el lograrlo depende del tipo de compactación y la distribución de la energía de compactación en el volumen por preparar. La densificación por capas se ha reconocido determinante para alcanzar la homogeneidad; la compactación de 10 capas en un molde de relación $H / D > 2$, se ha considerado (Ref. 6) como muy conveniente.

Para la comparación de pesos volumétricos y la dirección vertical se empleo un molde de 79.1 mm de diámetro, el cual es longitudinalmente tripartido y recubierto con una lámina de teflón a fin de extruir fácilmente el espécimen, sin necesidad de prensa o de gato hidráulico. Cada una de las diez capas con que se compactó y fraccionó un espécimen, se determino por inmersión en agua, recubriéndolas previamente con parafina y brea. En la Fig 12 se muestran los resultados de la compactación por impactos y por presión estática en el suelo MH - Necaxa; se distingue que el procedimiento por amasado obtiene especímenes más uniformes. En dos pruebas efectuadas de cada procedimiento de compactación, los coeficientes de variación de los pesos volumétricos totales fueron 0.26 y 0.39 % para el de amasado y de 0.52 y 0.77 % para el de presión estática.

Por otra parte, cabe comentar que cuando se compacta estáticamente una muestra en una sola capa, como es usual para los ensayos VRS se genera también un espécimen con peso volumétrico decreciente hacia el extremo superior, ello como resultado de la fricción que debe ir venciendo durante la densificación. Al seccionar varios especímenes así formados, se midió una diferencia en el γ_d de aproximadamente 5.3 %. Una manera que se encontró para reducir esta diferencia, aunque más complicada, fue la de emplear un pistón en cada extremo del cilindro.

4.6 Pisón no circular para compactación por amasado

En el inciso anterior se revisó el aspecto de homogeneidad en la dirección longitudinal, a través de la altura, de especímenes compactados; aquí se revisa el aspecto de homogeneidad en la dirección transversal.

Tradicionalmente se han empleado pisonos de sección circular (Ref. 8) para la compactación por amasado, cuyo diámetro es del orden del 40 % del diámetro del molde. Con esta geometría se cubre el área transversal con 9 aplicaciones, 8 en la periferia a cada 45° y tangentes a la pared y la restante al centro; la ronda siguiente de pisonadas van defasadas 22.5° respecto a las de la primera ronda, buscando cubrir toda el área, y así sucesivamente. Al proceder de esta manera se generan zonas en donde se traslapan las pisonadas y otras en donde éstas son mínimas; así cuando se aplican 27 pisonadas, ciertas áreas reciben hasta 6 pisonadas y otras sólo 1 ó 2.

El procedimiento anterior trae como consecuencia que no se alcance mismo γ_d en la dirección radial, como pudo comprobarse al seccionar cuidadosamente sectores circulares de especímenes de 152.4 mm de diámetro, procediendo como se señaló en el inciso anterior para determinar el γ_r .

Para atenuar este efecto se consideró conveniente diseñar un nuevo pisón que distribuyera mejor la energía de compactación en todo el volumen y que lo hiciera en un número más reducido de pisonadas. Surgió así la idea de un pisón con cuatro sectores de 30° cada uno, dispuestos a cada 90°, semejando una cruz de Malta, Fig 13a; su diámetro es 1mm menor que el molde. Se consideró inicialmente que el ancho de los sectores reduciéndose hacia el centro provocaban un efecto con la profundidad de menor cuantía que las zonas más anchas de la periferia; por ello se decidió construir el prototipo con una base penetrante, Fig 13b. Pronto se vieron las dificultades prácticas al formar especímenes con superficie extrema cónica, aun cuando así se encontró la menor dispersión de γ_d en el sentido radial. Para salvar esta dificultad se propuso una base plana y el aumento en planta de la zona central, Fig. 13c. De esta manera se llegó a un pisón de compactación práctico para operarse con el compactador neumo-mecánico, que no tiene mayor dispersión de γ_d en dirección radial que el pisón circular y que reduce a la tercera parte el número de pisonadas.

5. PREPARACION DEL SUELO POR COMPACTAR

5.1 Sobre los procedimientos de preparación y sus efectos

Una vez decidido el tipo de compactación, la mayor parte de las veces no se le presta cuidado suficiente a la preparación del material; se llama la atención acerca de estos aspectos del trabajo experimental, ya que puede afirmarse que los resultados de la compactación de suelos cohesivos dependen de la forma como se compactan y del modo como se preparan para el ensaye.

Los procedimientos estándar de preparación de los suelos establecidos por entidades tales como la ASTM y la AASHTO, indican un secado de material a una temperatura que no exceda los 60°C (Ref. 15). En nuestro país, SCT recomienda este procedimiento (Ref. 12); así como la SARH (Ref. 16); en el inciso siguiente se describirán las limitaciones y contraindicaciones de esta práctica, sobre todo en presencia de suelos residuales. Como resultado de este secado se forman grumos, de cuyo tamaño ligado al del molde, se derivan los efectos descritos en los incisos 4.2 a 4.4.

Otra variable del procedimiento de preparación es el tiempo de curado del material, que es el lapso comprendido entre el momento el que se añade agua y el de su compactación; éste es necesario para distribuir uniformemente el agua en el suelo. Las mayores diferencias en el γ_d y la resistencia de especímenes con diferentes tiempos de curado, ocurren en la rama seca. Para la mayoría de los suelos se recomienda fijar como tiempo de curado un día, lo que en el campo puede llevar del orden de una semana.

En lo referente a la acción de añadir agua al suelo, cuanto más finas sean las gotas más fácil y en menos tiempo se podrán incorporar a los grumos para alcanzar una distribución uniforme del contenido de agua; no es aceptable agregar el agua a chorros. Un atomizador o una pistola de aire, ésta a una presión de 1.5 Kg/cm² aproximadamente, resultan muy apropiados. Se llama la atención de eventuales diferencias entre la compactación de campo y la de laboratorio por el tipo de agua utilizado.

Por lo que respecto al rehuso de material para compactar varios especímenes con diferentes contenidos de agua, se sabe que la curva de compactación así obtenida adquiere valores del $\gamma_{d \text{ max}}$ del 1 al 4% superiores a los que se alcanzan usando porciones separadas de material

para definir cada punto de la curva $\gamma_d - w_c$ (Ref. 17). La práctica de rehusar el material debe eliminarse; no se justifica el muestreo de una cantidad reducida de material de un banco de préstamo.

5.2 Efectos del secado en los suelos residuales.

Los suelos residuales exhiben características muy particulares, en particular en las curvas de compactación y sus propiedades índice y mecánicas, por su alta sensibilidad al secado. Los suelos residuales volcánicos abundan en México como resultado de la intemperización de rocas ígneas jóvenes o cenizas volcánicas; el suelo MH - Necaxa es de este tipo (ver Tabla II) y con el se muestra cómo el procedimiento de preparación puede modificar las características de compactación y de resistencia. Al efectuar dos pruebas de compactación con energía correspondiente a la Proctor estándar, una con la fracción previamente secada al ambiente ($w_1 = 5\%$) y la otra a partir de un contenido de agua próximo al natural, se obtiene dos de las tres curvas de la Fig. 14. Con el material previamente secado se observa un significativo aumento del $\gamma_{d \max}$ y una considerable reducción en el w_{opt} ; una tercera curva perteneciente al material previamente secado reproduce el mismo $\gamma_{d \max}$ del material no secado, pero con sólo la cuarta parte de energía de compactación.

Los resultados anteriores se pueden interpretar de la manera siguiente: Los esfuerzos de succión crecientes con el secado provocan esfuerzos de compresión sobre el esqueleto mineral de los grumos llevándolos a una porosidad baja. Por otra parte, se ha comprobado que las partículas del mismo suelo pero sin secado previo se encuentran en forma de agregados (Ref. 18), aunque en asociaciones más porosas que los " grumos secos ". Al compactar ambas fracciones con la misma energía de compactación, la menor porosidad de los " grumos secos " se refleja en un $\gamma_{d \max}$ mayor y un w_{opt} menor, de manera semejante a lo que ocurre en un material cohesivo con porcentaje creciente de granos (ver Fig. 6); así pues los " grumos secos " se asemejan en cierta medida a los granos duros, como lo demuestra el hecho de que al añadirles agua ni al compactarlos se destruyen totalmente.

Por la coincidencia de curvas de compactación para la combinación material no secado cierta energía y material secado - mucho menor energía, puede considerarse que el secado previo es equivalente a emplear una energía mayor de compactación.

Con cierta frecuencia se suscita la reclamación de los constructores en el sentido de que no es posible alcanzar el γ_d o grado de compactación proyectado, aun con equipo pesado y gran cantidad de pasadas; la razón puede residir en que la curva patrón de compactación se haya obtenido en el laboratorio con material previamente secado.

No obstante la diferencia en las curvas de compactación con la misma energía entre los materiales natural y previamente secado, resulta sorprendente que las máximas resistencias a compresión no confinada sea muy semejantes, Fig. 15. Estos resultados, inusitados frente a la experiencia acumulada en suelos aluviales o coluviales, fueron ya anotados por Terzaghi (Ref. 19) para el caso de los suelos residuales volcánicos de Kenya y Java. Al parecer un efecto de escala llevado la nivel de los grumos podría explicar que aunque el espécimen alcance un mayor γ_d en los previamente secados, sus grumos posean, por ser más grandes, debilidades mayores que propicien la falla.

El secado en los suelos residuales provoca cambios que en general son irreversibles, afectando granulometría y límites de plasticidad (Ref. 20), además las curvas de compactación. Esto es particularmente válido en los suelos residuales haloisíticos a los que la deshidratación previa les modifica incluso su mineralogía. Un resultado muy semejante al caso antes expuesto es el del suelo proveniente del aeropuerto internacional de San José, Costa Rica (Ref. 21) en el que no obstante la gran diferencia en γ_d entre los especímenes con y sin secado previo, Fig. 16, se alcanzó en ambos el mismo valor relativo de soporte.

5.3 Tiempo de reposo

Cuando la realización de algún ensaye para determinar propiedades mecánicas ocurre tiempo después de compactar cierto suelo, éstas sufren diferencias importantes con respecto a las de especímenes frescos; se reconoce como tiempo de reposo al lapso transcurrido entre la compactación y la ejecución de algún ensaye.

Se presentan enseguida los resultados del ensaye de los cuatro suelos cohesivos, preparados con tres contenidos de agua correspondientes a la rama seca, al óptimo, y a la rama húmeda de la curva de compactación por amasado 25-10-10 (25 pisonadas de 10 kg - 7.87 kg/cm² - en cada una de las 10 capas), para cada contenido de agua de cada suelo se compactaron 10 probetas el mismo día (Ref. 18), de las cuales se fueron ensayando a diferentes tiempos de reposo, teniendo especial cuidado de protegerlas contra pérdidas de humedad.

La variación de R_q con el tiempo de reposo se muestra en la Fig. 17, siendo R_q la relación entre las resistencias a la compresión no - confinada para cierto tiempo de reposo, t , y el tiempo de reposo considerado como inicial (30 minutos). Se aprecia que la resistencia aumenta con el envejecimiento en los cuatro suelos, resultando más valores de R_q del orden de 2.5 notorio el incremento cuanto mayor es el contenido de agua de compactación; se alcanzan para $t = 500$ días.

Para estudiar los cambios de la deformabilidad por el envejecimiento se definió la relación R_M como el cociente de los módulos secantes al 50 % de la deformación de falla en los ensayes q_u , para un tiempo de reposo t y el inicial. Aunque con dispersión mayor a la de R_q , se encontró que R_M puede alcanzar valores incluso mayores que R_q , sobre todo en los materiales compactados en la rama húmeda. Este efecto de "endurecimiento" por el envejecimiento puede justificar, por lo menos cualitativamente, las diferencias que a menudo se tienen entre las mediciones in-situ de las deformaciones de una estructura térrea, y aquellas estimadas con el método de los elementos finitos con base en los resultados de ensayes de laboratorio con especímenes frescos.

6. PROCEDIMIENTOS DE COMPACTACION Y SU INFLUENCIA EN LA RESISTENCIA CORTANTE Y DE LA DEFORMABILIDAD

6.1 Impactos, amasado y presión estática

En el inciso 2.2 se señaló la influencia que tiene el tipo de compactación sobre las propiedades mecánicas de los suelos compactados. A los resultados ahí presentados que indican diferencias significativas en el VRS de especímenes compactados por impactos y presión estática, se añaden en este capítulo los referentes a los cuatro suelos cohesivos en

estudio, compactados por impactos, amasado y presión estática; a los especímenes así densificados se les falló en pruebas de compresión no-confinada, con lo que se tiene un índice de la resistencia y deformabilidad en su condición no-drenada.

Cada uno de los suelos ensayados se compactaron con cinco diferentes energías en cada uno de los tres tipos de compactación; las condiciones en cada caso fueron las indicadas en la Tabla IV. Siempre se utilizó un molde de 3.6 cm de diámetro y 8.5 cm de altura, los suelos fueron previamente secados al ambiente, de tal suerte que el contenido inicial de agua de cada uno fue el señalado en la tabla II y la granulometría, la mencionada en la tabla III.

Se decidió secar los suelos al ambiente, a pesar de los efectos conocidos del secado con objeto de partir sistemáticamente para las pruebas de compactación, con el mismo contenido inicial de agua y con la misma granulometría de grumos; ello por la dificultad de preservar el contenido natural de agua de una gran cantidad de material a través del tiempo.

Tabla IV. Condiciones de compactación de los suelos ensayados a compresión no confinada

| SUELO | IMPACTOS | | | | | AMASADO | | | ESTATICA | |
|----------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-----------------|----|----|------------|-------|
| | E_c | P | H | N_g | N_c | $N_p - F - N_c$ | | | σ_c | N_c |
| SM San Vicente | 1.5 | 0.466 | 3.6 | 8 | 10 | 27 | 5 | 10 | 6.0 | 10 |
| | 3.0 | 0.466 | 7.2 | 8 | 10 | 27 | 10 | 10 | 12.0 | 10 |
| | 6.0 | 0.466 | 14.55 | 8 | 10 | 27 | 20 | 10 | 24.0 | 10 |
| | 10.3 | 0.802 | 14.55 | 8 | 10 | 27 | 30 | 10 | 45.0 | 10 |
| | 27.4 | 1.472 | 20.95 | 8 | 10 | 17 | 40 | 10 | 65.0 | 10 |
| SC Chicoasén | 1.5 | 0.466 | 3.6 | 8 | 10 | 27 | 5 | 9 | 3.0 | 10 |
| | 3.0 | 0.466 | 7.2 | 8 | 10 | 27 | 10 | 9 | 6.0 | 10 |
| | 6.0 | 0.466 | 14.55 | 8 | 10 | 27 | 15 | 9 | 12.0 | 10 |
| | 10.3 | 0.802 | 14.55 | 8 | 10 | 27 | 20 | 9 | 24.0 | 10 |
| | 27.4 | 0.732 | 20.95 | 16 | 10 | 27 | 40 | 10 | 45.0 | 10 |
| MH Necaxa | 1.5 | 0.466 | 3.5 | 8 | 10 | 36 | 5 | 10 | 2.85 | 10 |
| | 3.0 | 0.466 | 7.2 | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 6.3 | 10 |
| | 6.0 | 0.466 | 14.55 | 8 | 10 | 18 | 15 | 10 | 15.8 | 10 |
| | 10.3 | 0.802 | 14.55 | 8 | 10 | 27 | 20 | 10 | — | 10 |
| | 27.4 | 0.732 | 20.95 | 16 | 10 | - | - | - | — | 10 |
| CH La Peña | 1.5 | 0.466 | 3.5 | 8 | 10 | 36 | 5 | 10 | 3.9 | 10 |
| | 3.0 | 0.466 | 7.2 | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 6.0 | 10 |
| | 6.0 | 0.466 | 14.55 | 8 | 10 | 18 | 15 | 10 | 12.3 | 10 |
| | 10.3 | 0.802 | 14.55 | 8 | 10 | 17 | 20 | 10 | 41.3 | 10 |
| | 27.4 | 0.732 | 20.95 | 16 | 10 | | | | | |

- P Peso del martillo de compactación, en Kg. (diámetro del martillo, 1.8 cm)
H altura de caída libre del martillo, en cm
 N_g número de golpes en cada una de las 10 capas
 N_c número de capas
 $N_p - F - N_c$ Número de pisonadas por capa-fuerza aplicada por el pisón, kg-número de capas (diámetro del pisón, 1.27 cm)
 σ_c esfuerzo axial de compactación, en kg/cm²
 E_c energía específica de compactación, en kg-cm / cm³

Tabla V. Efecto de los diferentes métodos de compactación sobre la resistencia* q_u y el modulo de deformación inicial M_0

| Suelo | Sr % | γ_{dc} g/cm ³ | R_{qu} | | R_{MO} | | Suelo | Sr % | γ_{dc} g/cm ³ | R_{qu} | | R_{MO} | | |
|---------|--------------|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|--------|--------------|---------------------------------|----------|----------|----------|------|------|
| | | | Amasado | Estática | Amasado | Estática | | | | Amasado | Estática | | | |
| SM | 70 | 1.35 | 0.64 | 1.27 | 0.60 | | CH | 70 | 1.10 | 1.73 | 1.27 | | 5.17 | |
| | | 1.40 | 0.97 | 1.19 | 0.90 | | | | 1.15 | 1.28 | 0.95 | 0.98 | 2.41 | |
| | | 1.45 | 1.05 | 1.04 | 0.98 | | | | 1.20 | 0.97 | 1.14 | 0.68 | 1.51 | |
| | | 1.50 | 1.09 | 0.97 | 1.00 | | | | 1.25 | 0.87 | 1.37 | 0.65 | 1.12 | |
| | | 1.55 | | 0.89 | | | | | 1.29 | 0.99 | | 0.69 | 1.06 | |
| SAN | 90 | 1.35 | | 1.00 | | | LA | 90 | 1.20 | 1.05 | | 2.07 | | |
| | | 1.40 | 0.97 | 1.14 | | | | | 1.24 | 1.15 | 0.86 | 1.82 | 5.07 | |
| | | 1.45 | 1.07 | 1.08 | 0.84 | | | | 1.28 | 1.27 | 0.93 | 1.21 | 3.54 | |
| | | 1.50 | 1.08 | 1.02 | 1.22 | | | | 1.32 | 1.16 | 1.06 | 0.89 | 2.18 | |
| VICENTE | en el optimo | 1.55 | 1.01 | 0.95 | 1.13 | | PEÑA | En el optimo | 1.36 | 0.99 | 1.20 | 0.84 | 1.31 | |
| | | 1.35 | | 0.93 | | | | | 1.24 | 0.99 | 0.95 | 1.03 | 5.23 | |
| | | 1.40 | 1.02 | 1.04 | | | | | 1.28 | 0.85 | 0.88 | 0.78 | 3.35 | |
| | | 1.45 | 1.10 | 1.02 | 0.97 | | | | 1.32 | 0.64 | 0.74 | 0.61 | 1.76 | |
| | | 1.50 | 1.13 | 1.03 | 1.43 | | | | 1.36 | 0.49 | 0.59 | 0.58 | 0.92 | |
| | | 1.55 | 1.00 | 0.99 | 1.30 | | | | 1.40 | 0.40 | 0.49 | | 0.59 | |
| | | 1.85 | 0.75 | 0.92 | 0.89 | 0.81 | | | | 1.20 | 1.04 | | 1.59 | 1.11 |
| | | 1.90 | 0.79 | 0.89 | 0.64 | 0.73 | | | | 1.25 | 0.93 | 0.85 | 1.29 | 1.26 |
| | | 1.95 | 0.77 | 0.88 | 0.64 | 0.77 | | | | 1.30 | 0.81 | 0.92 | 0.96 | 1.19 |
| | | 2.00 | 0.74 | 0.85 | 0.75 | 0.79 | | | | 1.35 | 0.85 | 1.01 | 0.84 | 1.14 |
| SC | 70 | 2.05 | 0.71 | 0.78 | 0.90 | 0.82 | MH | 70 | 1.38 | 0.90 | 1.08 | | | |
| | | 1.90 | | 2.42 | | 2.85 | | | | 1.30 | 0.98 | 0.85 | 1.31 | 1.27 |
| | | 1.95 | 1.00 | 1.34 | 0.40 | 1.91 | | | | 1.35 | 1.01 | 1.03 | 1.34 | 1.49 |
| CHICO- | 90 | 2.00 | 0.82 | 0.89 | 0.49 | 0.87 | NECAXA | 90 | 1.40 | 0.94 | 1.02 | 1.06 | 1.36 | |
| | | 2.05 | 0.84 | 0.77 | 0.60 | 0.74 | | | | 1.45 | 0.93 | 0.94 | 1.25 | 1.21 |
| | | 2.10 | 0.87 | 0.85 | 1.19 | 0.93 | | | | 1.50 | | 0.96 | | 1.09 |
| ASEN | en el optimo | 1.90 | | 2.44 | | 3.35 | | 1.30 | 0.80 | 0.77 | 0.93 | 1.41 | | |
| | | 1.95 | 1.16 | 1.50 | 0.42 | 1.95 | | 1.35 | 0.84 | 1.02 | 0.87 | 1.50 | | |
| | | 2.00 | 0.94 | 1.02 | 0.46 | 1.17 | | 1.40 | 0.80 | 1.04 | 0.75 | 1.33 | | |
| | | 2.05 | 0.91 | 0.84 | 0.58 | 0.83 | | 1.45 | 0.70 | 0.95 | 0.60 | 1.16 | | |
| | | 2.10 | 0.89 | 0.91 | 0.85 | 0.98 | | 1.50 | | 0.89 | | | | |

* Se presentan los valores normalizados. Para la compactación por impactos $R_{qu} = R_{MO}$

6.2 Comparación de características esfuerzo-deformación

Con base en los resultados de los ensayos descritos en el inciso anterior, para cada suelo fue posible comparar tanto la resistencia q_u , como los módulos de deformación inicial M_o de especímenes compactados por impactos, amasado a presión estática: Tal comparación se realizó para ciertos grados de saturación y pesos volumétricos secos preestablecidos; los resultados se presentan normalizados en la Tabla V, con respecto a los de la compactación por impactos.

Al densificar cada suelo con diferente tipo de compactación se alcanzan diferentes resistencias y módulos de deformación, con iguales valores de γ_d y S_r ; así pues, una variable significativa de los suelos cohesivos compactados es el arreglo geométrico espacial que guardan los grumos, agregados y/o partículas, en combinación con sus intrahuecos e interhuecos. Esta estructura de los suelos compactados está influenciada por la magnitud de las deformaciones cortantes (distorsiones) que dependen a su vez del tipo de compactación. Cuanto mayores son las distorsiones que se ejercen al suelo durante su compactación, menor es su resistencia y considerablemente mayor su deformabilidad; los resultados de la Tabla V así lo señalan; ya que la compactación por amasado induce las mayores distorsiones, en tanto que son mínimas en la compactación por presión estática.

El mayor módulo M_o se logra con la compactación estática, para mismo γ_d e igual S_r . El caso extremo entre los suelos ensayados es el del suelo residual MH - Necaxa, en cuya rama seca el M_o obtenido de un espécimen compactado estáticamente, resultó de cinco veces el alcanzado por impactos.

Por otra parte, puede apreciarse que las mayores diferencias en resistencia y deformabilidad debidas al tipo de compactación, ocurren en los suelos francamente finos; las diferencias que acusan los suelos arenosos SM y SC son reducidas, aun cuando la compactación por amasado produce también la menor resistencia en el suelo SC. en términos generales, se puede apreciar que para cada grado de saturación, las mayores diferencias en resistencia y deformabilidad por el tipo de compactación ocurren para los valores menores de γ_d ; en este caso, la mayor diferencia respecto a la de impactos, ocurre en las muestras compactadas estáticamente.

CONCLUSIONES.

Se ha demostrado cómo diferentes condiciones en la preparación y ejecución de los ensayos de compactación, dan como resultado cambios importantes en las propiedades físicas y mecánicas de los suelos cohesivos compactados.

Precisamente para definir los parámetros de tales propiedades con fines de diseño, es trascendental reproducir en el laboratorio lo más fiel ingenierilmente posible a través de los especímenes compactados, las características que se tienen o tendrán en el prototipo, sometido a la compactación de campo. Inclusive si la compactación de laboratorio tiene como objetivo solamente establecer una curva patrón de compactación con fines de juzgar la calidad de la operación de campo, la manera de preparar el material para el ensayo podría impedir un control racional ; en efecto, si por ejemplo se secan previamente ciertos suelos residuales, seguramente se tendrá dificultad para alcanzar cierto grado de compactación en la obra con los suelos trabajados a partir de su contenido natural de agua. Así, la identificación y caracterización de los suelos por compactar adquiere primordial importancia.

Como resultado también del secado los suelos se agrupan, condicionando así una granulometría de agregados totalmente diferente al de las partículas, lo que conduce a posibles efectos de pared y escala dependiendo del tamaño del molde utilizado, incluso en suelos francamente finos.

Aun cuando son escasas las investigaciones acerca de las propiedades de los suelos compactados en el campo, éstas señalan que los equipos modernos de compactación generan distorsiones en los suelos cohesivos que podrían semejarse más a la compactación por amasado. Para el caso, se propone en este trabajo un compactador neumó-mecánico simple que permite compactar especímenes hasta de 15 cm de diámetro.

Con base en un estudio amplio de la compactación por impactos, amasado y presión estática, se puso de manifiesto el efecto que tiene el tipo de compactación en la deformabilidad y la resistencia cortante; los suelos más sensibles a ello son los francamente finos. Las distorsiones que genera cada tipo de compactación provocan diferentes arreglos de sus agregados y partículas, los que condicionan las diferentes propiedades mecánicas observadas.

RECONOCIMIENTOS

La mayoría de los resultados aquí presentados están basados en el proyecto de investigación realizados en el Instituto de Ingeniería, UNAM, con el patrocinio de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, a través de la Dirección General de Servicios Técnicos. El autor expresa su agradecimiento al Prof. R.J. Marsal y al Ing. J. Alberro por la acertada orientación y supervisión del trabajo experimental. Otros ingenieros han participado en las diversas etapas del proyecto; se reconoce particularmente la colaboración del Ing. G. Hiriart.

REFERENCIAS

- 1.- SCT (1985), Normas de calidad de los materiales, Libro 4; parte 01 carreteras y aeropistas; Título 01 Materiales para terracerías, 4,01,01, México
- 2.- Aguirre, L M (1964) " Correlación entre las pruebas estáticas y dinámicas de compactación de suelos en laboratorio", Tesis de Maestría, *División del Doctorado UNAM*
- 3.- Alberro, J (1966) " Estudio de una correlación entre pruebas de compactación estática y dinámica", *Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM*
- 4.- Murillo, M A (1984) " Coeficientes de equipo valencia para evaluar el tránsito en el diseño de pavimentos flexibles y comparación de la variabilidad en las pruebas de VRS de especímenes estática y dinámicamente compactados " Tesis Profesional dirigida por F. Olivera B, *UNAM-ENEP, Aragón*
- 5.- Rico, A y del Castillo, H (1974), La ingeniería de suelos en las vías terrestres, Tomo I, Limusa, México
- 6.- Casagrande, A , Hirschfeld, R (1960) " Strees-Strain deformation and stregh characteristics of clay compacted to a constant dry unit weight ", Harvard soli Mechanics series No 61, Cambridg, Mass
- 7.- Casagrande, A , Hirschfeld, R (1960) " Strees-Strain deformation and stregh characteristics of clay caompacked to a constant dry unit weight ", Harvard soli Mechanics series No 70, Cambridg, Mass
- 8.- Wilson, S D (1950) " Small soil compaction apparatus duplicates field results closely" , engineering News record, Vol 145, No 18
- 9.- Alberro , J , Mendoza, M J, Marsal, R J e Hiriart, G (1982) " Comportamiento de suelos compactados ", Cuarto Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM, a la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, México
- 10.- Alberro, J, Marsal, R J y Mendoza, M J.(1985) " Comportamiento de suelos cohesivos compactados", series del Instituto de Ingeniería, No. 493
- 11.- Terzaghi, K (1956) " Correspondence" (Comentarios sobre el trabajo de G H Bolt), Géotechnique, Vol VI, Londres
- 12.- SAOP (1981), Instructivo para efectuar pruebas en seuelos, Apoyo Didáctico, Vol 1, México
- 13.- Marsal, R J (1969) " Contribution on mechanical propeerties of rockfill ", VII ICSMFE, Specialty Session No 13, México

- 14.- Gau, F L y Olsen, R E (1971) " Uniformity of Specimens of a compacted clay ", journal of Materials, JMLSA, Vol 6, No. 4 pp 874-888
- 15.- American Society of Testing Materials (1975), ASTM Standars, Part 19, Designation D698-70A, USA
- 16.- S R H (1970), Manual de mecánica de Sulelos, Quinta edición, México
- 17.- Johnson A W y Sallberg, J R (1962) " factors influencing compaction test results" Highway Research Board, Bulletin 319 Washington D.C
- 18.- Mendoza, M J (1982) " características esfuerzo - deformación de suelos cohesivos compactados: efectos estructurales ", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM
- 19.- Terzaghi, K (1958) " Design and performance of the Sasumua dam ", and " Discussion", Procs. Institution of Civil Engineers, 9, Londres
- 20.- Marsal, R J y Mendoza, M J (1985), Contribuciones al Primer congreso Internacional sobre geomecánica de Suelos Tropicales lateríticos y Saprolíticos-tropical LS'85, brasilia, Publicación No. 48, CFE, México
- 21.- Morin, W J y todor, P C (1975), laterite and lateritic soils and other problem soils of the tropics, Lyon AsSoc. for AID, USA

FIGURAS

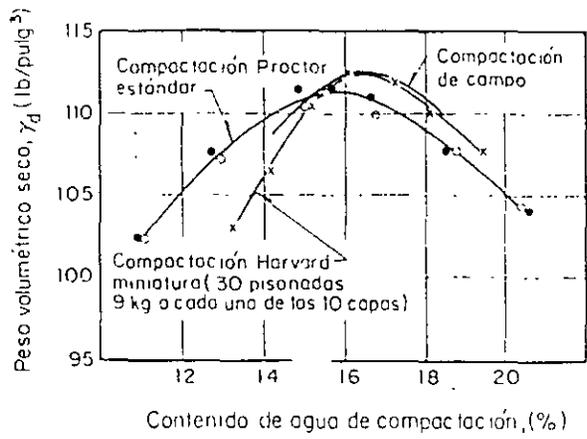


Fig. 1 Comparación de curvas de compactación de laboratorio y campo (ref. 5)

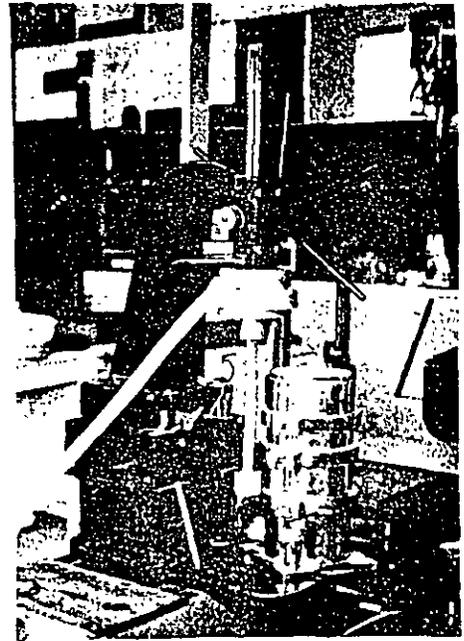


Fig. 2 Vista del compactador neumomecánico

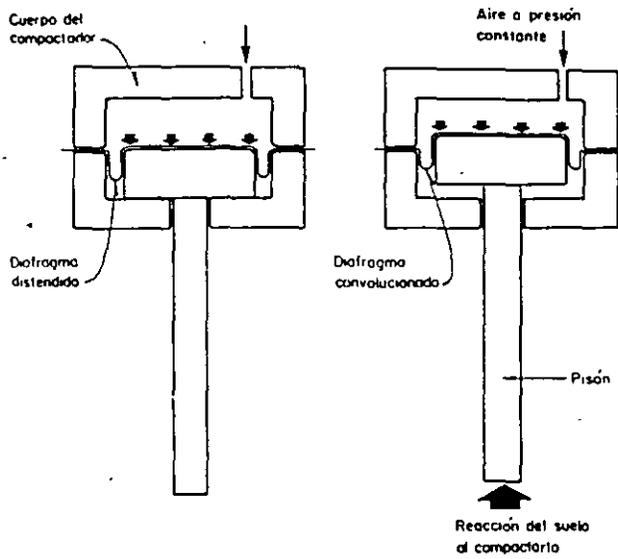


Fig. 3 Principio de operación de los compactadores neumáticos

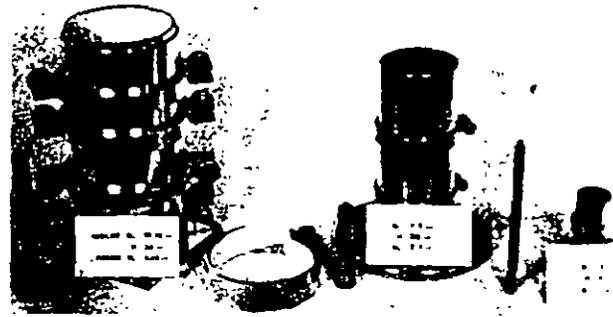


Fig. 4 Vista de moldes y pisones de compactación de diferentes tamaños

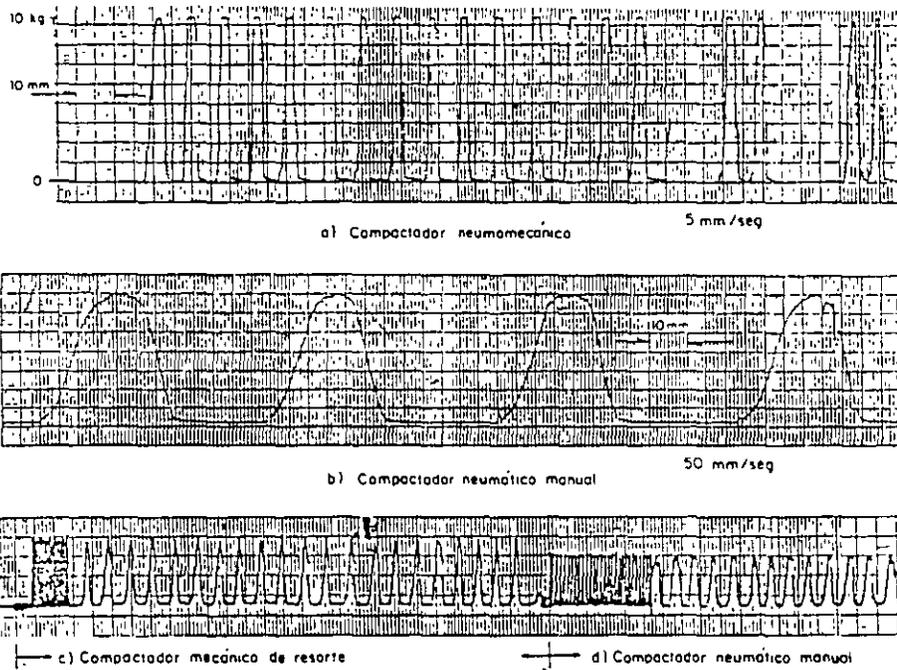


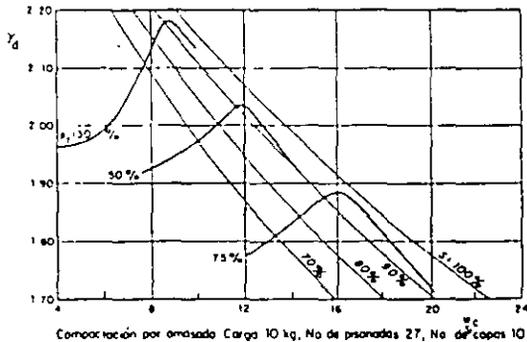
Fig. 5 Registros de la aplicación de pisonadas a través del tiempo de diversos compactadores

Tabla III. Granulometría de partículas (1) y del suelo por compactar (2).

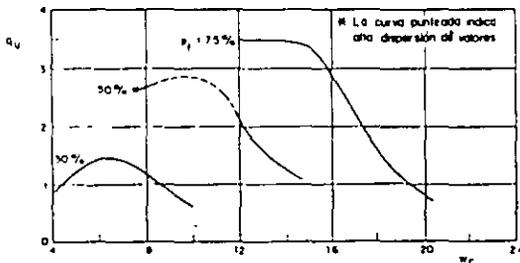
[Se indica el porcentaje que pasa en peso]

| Malla No. | SM-San Vicente | | SC-Chicoasén | | MH-Necaxa | | CH-La Peña | | SP-San Roque | |
|-----------|----------------|-----|--------------|-----|-----------|-----|------------|-----|--------------|-----|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 4 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 10 | 91 | 88 | 74 | 60 | 100 | 72 | 100 | 65 | 65 | 65 |
| 20 | 76 | 73 | 44 | 24 | 100 | 44 | 100 | 41 | 24 | 24 |
| 40 | 57 | 53 | 32 | 12 | 100 | 19 | 99 | 23 | 8 | 8 |
| 60 | 46 | 41 | 29 | 8 | 100 | 9 | 98 | 14 | 4 | 4 |
| 100 | 36 | 30 | 27 | 6 | 100 | 6 | 95 | 7 | 1 | 1 |
| 200 | 25 | 17 | 26 | 4 | 98 | 2.5 | 90 | 4 | 0 | 0 |
| <2 μ | 4.5 | - | 7.3 | - | 46 | - | 46 | - | 0 | 0 |

γ_d y w_c ; ello trae como consecuencia variación en las propiedades mecánicas. En la Fig 6 se muestra que en la medida que se aumenta el porcentaje de gruesos constituidos por granos duros, aumenta el γ_d y se reduce el w_c ; al no tener confinamiento, es explícable que en ese mismo sentido se reduzca la resistencia q_u .



Compactación por amasado Carga 10 kg, No de pasadas 27, No de capas 10



γ_d : Peso volumétrico seco, en g/cm³
 q_u : Resistencia en compresión no confinada, en kg/cm²
 w_c : Contenido de agua, en porcentaje
 P_i : Porcentaje de finos
 M_i : Muestra integral (pasa malla 4)

Fig. 6 Curvas de compactación y resistencia en compresión no confinada de mezclas de la arena SP-San Roque con los finos del suelo SC-Chicoasén

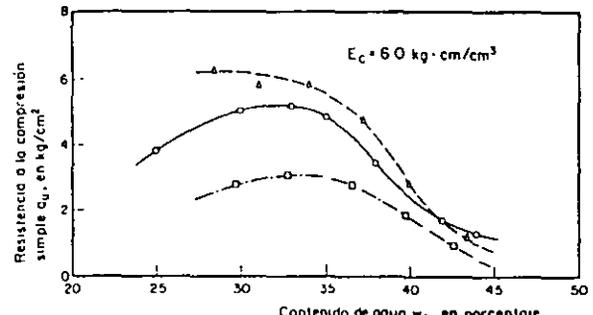
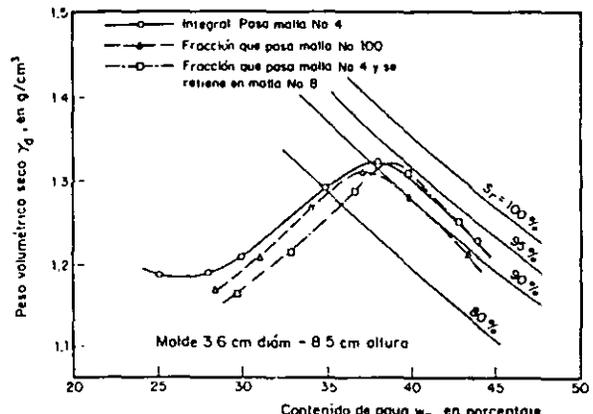


Fig. 7 Efecto de la granulometría de grumos del suelo MH-Necaxa secado al ambiente, sobre el γ_d y la resistencia q_u . Compactación por impactos

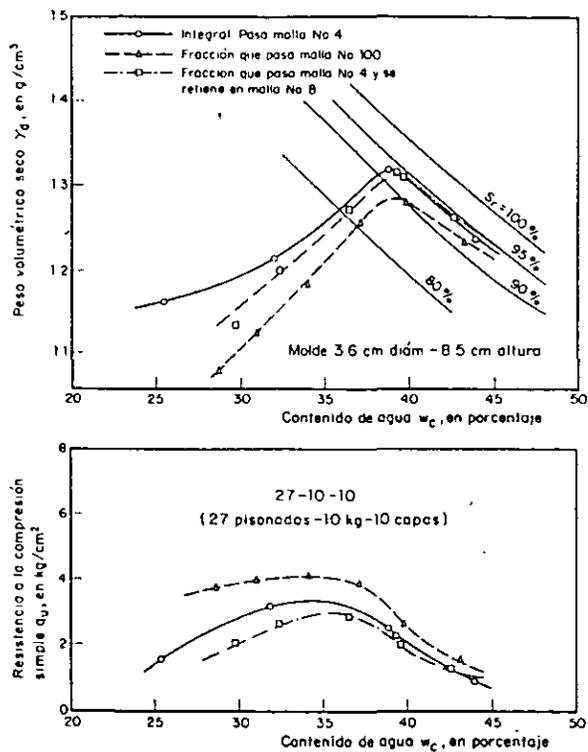


Fig. 8 Efecto de la granulometría de grumos del suelo MH-Necaxa secado al ambiente, sobre el γ_d y la resistencia q_u . Compactación por amasado

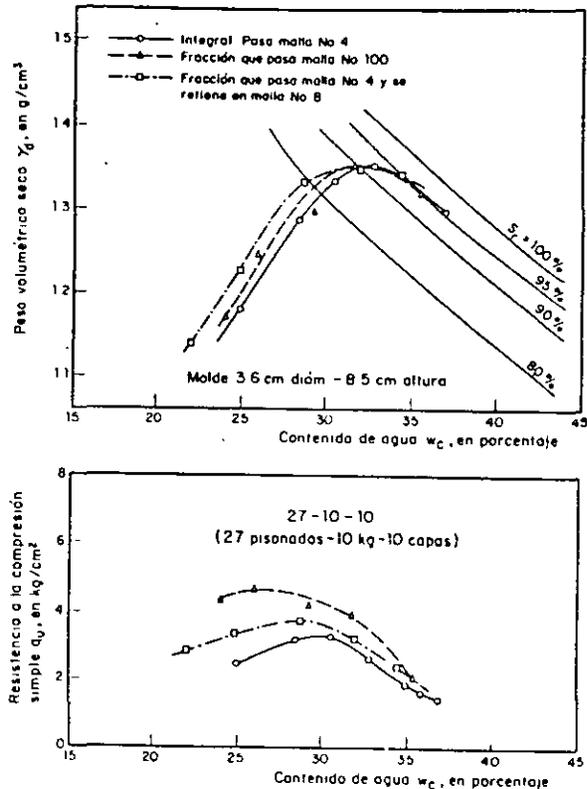


Fig. 9 Efecto de la granulometría de grumos del suelo CH-La Peña secado al ambiente, sobre el γ_d y la resistencia q_u . Compactación por amasado

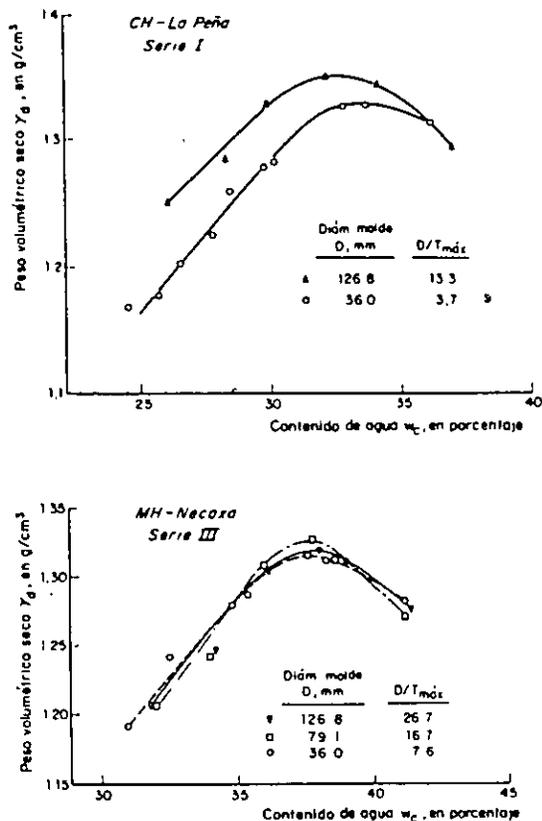


Fig. 10 Variación de las curvas de compactación por el efecto de pared

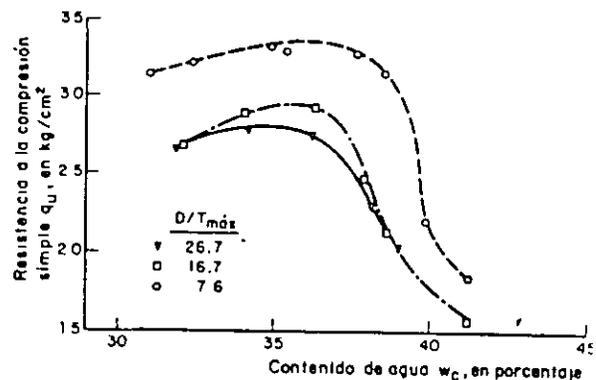


Fig. 11 Variación de la resistencia q_u por el efecto de escala

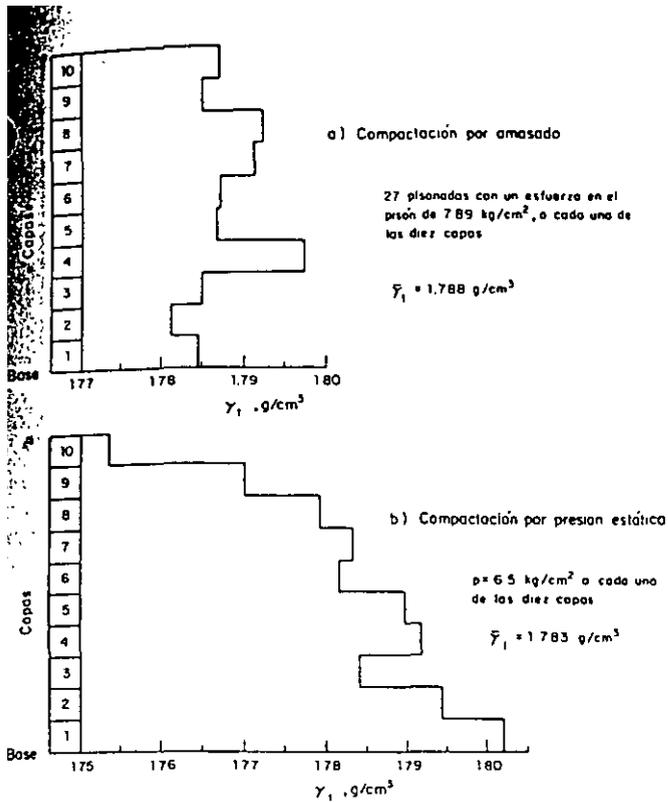


Fig. 12 Variación a través de la altura del peso volumétrico total de especímenes compactados por amasado y estáticamente. MH-Necaxa

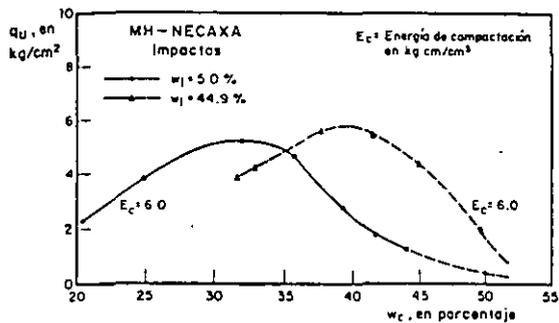


Fig. 15 Resistencia no confinada de los especímenes compactados por impactos del suelo MH-Necaxa, con y sin secado previo

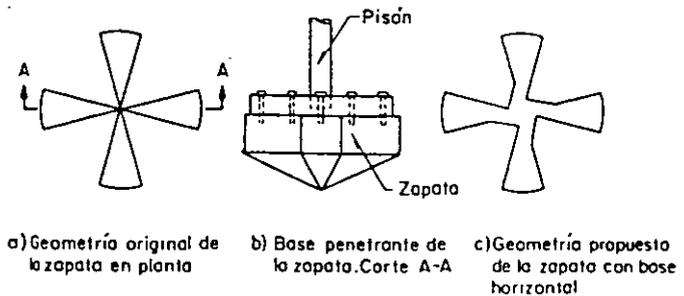


Fig. 13 Pisón de sectores para compactación por amasado

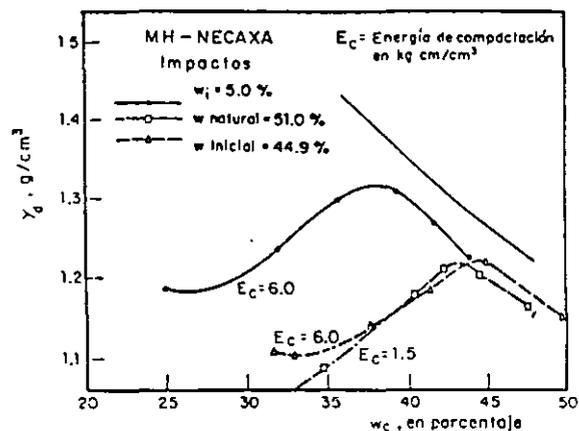


Fig. 14 Curvas de compactación por impacto del suelo MH-Necaxa con y sin secado previo

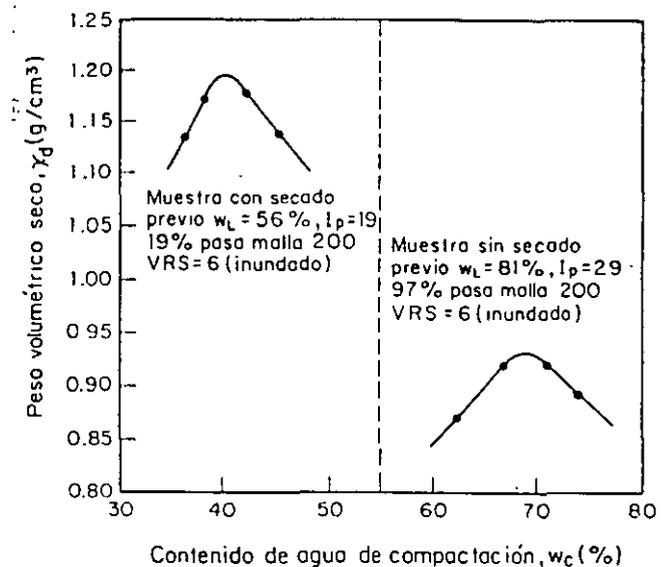


Fig. 16 Comparación de propiedades físicas de especímenes compactados con y sin secado previo (ref 21)

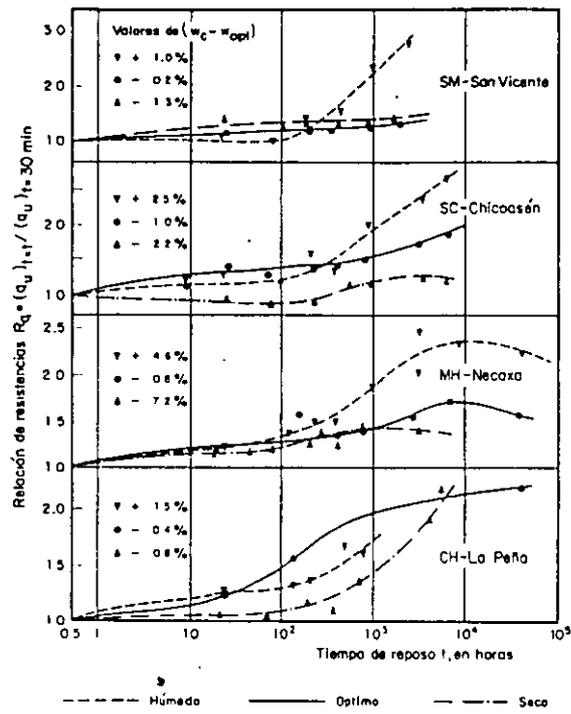
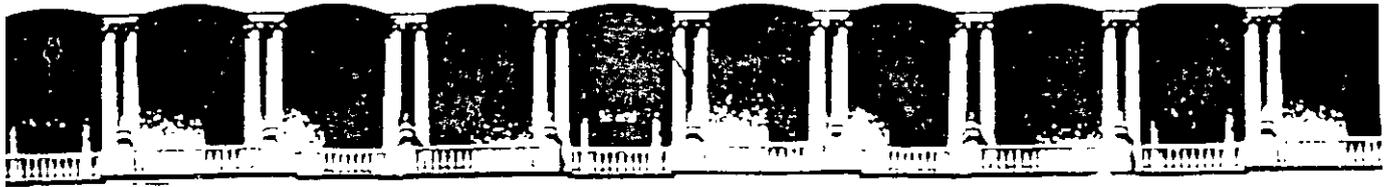


Fig. 17 Efecto del tiempo de reposo sobre la resistencia a la compresión no confinada de suelos compactados por amasado (25-10-10)



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS I

TEMA

**ALGUNAS DIVERGENCIAS ENTRE PRÁCTICAS
COMUNES DE COMPACTACIÓN Y LO QUE LA
INVESTIGACIÓN PARECE INDICAR**

**CONFERENCISTA
M. en I. MANUEL MENDOZA LÓPEZ
PALACIO DE MINERÍA
MAYO 2000**

Algunas divergencias entre prácticas comunes de compactación y lo que la investigación parece indicar.

Some discrepancies between common compaction practice and what research seems to indicate

A. Rico, Instituto Mexicano del transporte

RESUMEN: Se evoca la importante contribución de Raúl J. Marsal a la tecnología de compactación de suelos. Una parte de esos trabajos se realizaron para la actual Secretaría de Comunicaciones y Transportes y están, lógicamente, enfocados hacia el proyecto y la construcción de vías terrestres.

De la información arrojada por las investigaciones realizadas en el Instituto de Ingeniería bajo la dirección de Marsal se desprenden recomendaciones prácticas que los ingenieros de laboratorio y campo dedicados a las vías terrestres deberían invariablemente de guardar, aunque en algunas ocasiones no se guarden con el cuidado debido. Por esta razón se ha dado al trabajo de una forma en la que se comparan las recomendaciones convenientes con las normas de trabajo práctico a veces no tan cuidadosas; esa comparación se presenta bajo el nombre genérico de discrepancia.

Se espera que el trabajo cumpla con una función de utilidad y que sirva para recordar las importantes contribuciones de Raúl J. Marsal a la compactación de suelos.

1. PROPOSITO

Cuando se observa la práctica de compactación en el campo y en el laboratorio y se compara con la información confiable que ha ido produciendo la relativamente escasa investigación seria que se ha hecho sobre este proceso de uso casi universal, no pueden dejar de observarse algunas discrepancias importantes. En algunos casos se trata de prácticas de campo o laboratorio establecidas por añejas tradiciones, emanantes de juicios basados en una experiencia nunca probada; en otros casos son seguramente falsas interpretaciones de fenómenos no bien estudiados y, finalmente, algunos casos procederán de no haber retirado a tiempo prácticas que parecían razonables antes de sobrevenir conocimientos posteriores.

De ninguna manera pretende este trabajo ser original. Su función principal es evocar la contribución de Raúl Marsal a estos temas, que no fue escasa, que siempre fue original y también siempre importante. En segundo lugar, si este trabajo cumpliera una cierta función didáctica habría llenado todas las aspiraciones de su autor.

Debe decirse de una vez por todas que casi todos los detalles finos de información que se citan en este escrito provienen del conjunto de trabajos realizados por Marsal y sus colaboradores para la actual secretaria de Comunicaciones y Transportes (1992). La referencia resumen más consultada fue El comportamiento de Suelos Cohesivos Compactados (J. Alberro, R.J. Marsal y M. J. Mendoza . Publicación 493 del Instituto de

Ingeniería de la UNAM, 1985); otras referencias más específicas también se mencionan al final.

En tanto no se diga otra cosa este trabajo se refiere a suelos cohesivos.

2. PRIMERA DISCREPANCIA. EN LOS OBJETIVOS DE LA COMPACTACION.

En contra de toda lógica, muchas definiciones escritas y muchas acciones de campo apoyan la creencia de que para vastos sectores de la profesión el objetivo de la compactación es establecer un peso volumétrico en el suelo, con la aparente creencia implícita de que cuanto mayor sea éste, se tendrá un más favorable comportamiento de campo¹.

Obviamente el pensamiento actual establece que la compactación tiene por objetivo mejorar propiedades de comportamiento mecánico claramente identificadas, entre las que suele mencionarse la resistencia, la deformabilidad, las características esfuerzo-deformación, la permeabilidad, la flexibilidad y la resistencia a la erosión, principalmente.

Es sabido el papel histórico del peso volumétrico en el desarrollo de los trabajos de compactación y la utilidad actual del concepto como base de pago y como índice representativo de la descripción del suelo con vistas a comparaciones relativas.

La investigación actual indica que no existe ninguna correlación confiable (y menos, segura) entre el peso volumétrico que adquiere un suelo y las propiedades mecánicas alcanzadas. El conocimiento actual hace ver que un enorme número de parámetros ajenos a la simple evolución del peso volumétrico, condicionan el comportamiento de los suelos cohesivos compactados. Las referencias 2,3, y 4 permiten obtener abundante información suplementaria sobre este básico aspecto. También se mencionará en otras partes de este escrito.

3. SEGUNDA DISCREPANCIA. NO ESPECIFICAR EL CONTENIDO DE AGUA CON EL QUE SE COMPACTA

En muchos trabajos importantes de compactación no se tiene suficiente control (y a veces, casi ninguno) sobre el contenido de agua con el que se compacta en el campo.

Evidentemente, todo lo que se ha investigado hasta este momento sobre la compactación indica que la influencia de este valor es decisiva en los resultados obtenidos y en el control del proceso, siendo uno de los mecanismos más propicios para ajustar los resultados obtenidos en el campo a los efectos deseados. A despecho de que la importancia del contenido de agua en los resultados de la compactación aparecerá en todo lo que sigue, parece conveniente presentar aquí las Figs. 1 y 2 que ilustran algunos de los aspectos prácticos en que la influencia del contenido de agua de compactación es altamente relevante.

¹ El autor no desconoce que la práctica profesional no es totalmente homogénea en los diversos campos de aplicaciones, la experiencia del autor se ha desarrollado en la ingeniería de vías terrestres.

La Fig. 1 hace ver como se relaciona el contenido de agua con la energía de compactación (que se hace crecer en las sucesivas curvas de peso volumétrico máximo también creciente); estas relaciones permiten obtener resultados equivalentes en el campo con equipos y operaciones de diferente energía, sin más que variar convenientemente los contenidos de agua y también permiten ver como dentro de límites muy amplios se puede ajustar el proceso a contenidos de agua determinados variando la energía empleada. La Fig. 2 detalla este tipo de relaciones para aumentos de energía logrados con incrementos del número de pasadas o variaciones en la presión de inflado de llantas neumáticas. Las Ref. 3 y 5 detallan más este asunto.

A la luz de la información disponible debe considerarse como inadecuado un proceso de compactación en el que no se lleve un estricto control del contenido de agua de compactación y sus cambios.

4. CUARTA DISCREPANCIA. ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE LA ESTRUCTURA DE SUELOS FINOS COMPACTADOS.

Es cierto que el ingeniero que compacta en el campo no suele mostrar mayor interés por la estructura (arreglo y disposición de las partes sólidas cristalinas) que adquieran los materiales que compacta, a despecho de que para cualquier ingeniero debe ser una idea primaria que el arreglo y conexiones de las piezas estructurales ha de ser vital para definir el comportamiento conjunto. De hecho, en rigor, esta discrepancia podría decirse que surge más entre las ideas aún recientes de muchos investigadores y las concepciones actuales. hasta hace poco tiempo se hablaba de estructura de los suelos finos en términos del arreglo y disposición de sus partículas individuales; se mencionaban las estructuras orientadas y floculadas como, las más típicas (Refs. 3,4 y 5).

En la actualidad se piensa que las partículas individuales de los suelos arcillosos se agrupan en unidades (paquetes) con fuerzas de interconexión muy superiores a las que puedan ejercer los métodos de compactación, de hecho estos paquetes, submicroscopicos, se integran a su vez en flóculos que forman grumos, ya perceptibles a simple vista. se piensa que la estructura mecánica queda determinada por las interrelaciones entre esos paquetes y, sobre todo, entre los grumos.

El contenido de agua se considera un elemento esencial del funcionamiento estructural, en el sentido de cuando son bajos limitan el desarrollo de capas de agua en la superficie de los grumos y propician altas concentraciones de iones, reforzando los nexos eléctricos entre ellos, en tanto que contenidos de agua altos conducen al efecto contrario; así pueden explicarse las grandes diferencias que se obtienen al compactar de la misma manera en el lado seco y en el lado húmedo de la curva de compactación o al utilizar diferentes método de compactación.

investigaciones recientes realizadas en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Ref. 4, también citadas en la Ref. 5) hacen ver la importante diferencia que en resistencia y otras propiedades se obtienen al compactar de la misma forma un mismo suelo en ele que se han permitido diferentes grados de aglomeración particular.

No resulta fácil todavía incorporar estos resultados a los métodos de compactación de campo o a los de proyecto basados en pruebas de laboratorio, tal como ahora se realizan, pero la importancia de estos de estos efectos hace urgente completar la investigación necesaria.

5 CUARTA DISCREPANCIA. OPINION COMUN DE QUE AL COMPACTAR SUELOS FINOS, CUANTO MAYOR SEA EL PESO VOLUMETRICO ALCANZADO, SE OBTIENE MENOR COMPRESIBILIDAD.

El comentario que desea hacerse está orientado a alertar al ingeniero de campo contra los problemas de la sobrecompactación y en este sentido podrá agruparse con algunas otras discrepancias que se tratarán más adelante en este mismo escrito. En todas ellas, el mensaje que se trata de transmitir es que el cumplimiento de los objetivos fundamentales de la compactación exige un cuidadoso equilibrio entre muchos factores contradictorios y que el exceso de compactación, además de dispendioso, puede ser fuente de graves problemas de comportamiento.

En lo referente al planteamiento de la presente discrepancia se mencionará el hecho de que la compactación excesiva puede llevar a los materiales finos a condiciones de deformabilidad bajo carga altamente perjudiciales: La Fig. 3 es un modo no único de comprobar la afirmación anterior. Dos muestras de un mismo suelo compactado por el mismo método y con la misma energía, hasta el mismo peso volumétrico seco, pero seleccionadas, una en la rama húmeda y otra en la rama seca de la curva de compactación se colocan en condición de libre acceso al agua y sin restricciones externa a cambio volumétrico. puede verse que la muestra compactada del lado seco adquiere un potencial de succión muy importante que la lleva a manifestar una alta expansividad, en tanto que la muestra compactada del lado húmedo tiene una gran tendencia a conservar, bajo las condiciones señaladas, el estado adquirido por la compactación inicial. En otras palabras un suelo fino intensamente compactado puede convertirse fácilmente un material altamente expansivo, que al absorber agua muestre una compresibilidad mucho mayor a la que tendría con un grado de compactación inicial menor. Las Refs. 4 y 5 permitirán detallar estos aspectos.

La Ref. 1 hace ver que especialmente en suelos finos con minerales muy sensibles al agua, como la montmorilonita o bentonita; una compactación intensa del lado seco, seguido de una absorción posterior de agua, puede conducir al suelo compactado, cuando sobre el actúan presiones por material sobreyacente y otros aspectos externos, a un verdadero colapso estructural capaz de producir deformaciones de importancia. Tales minerales propician la formación de flóculos y grumos muy sensibles a la acción del agua. Al quedar sujetos a presiones los grumos se debilitan en sus nexos estructurales, cuando por efecto natural de tales presiones externas disminuye la tensión del agua contenida en los poros. En la misma Ref. 1 se hace ver que aún con contenidos de agua de compactación cercanos al óptimo pueden presentarse ligeros colapsos estructurales la absorción posterior de agua se efectúa bajo cargas axiales reducidas, lo que podría contribuir a explicar fenómenos de agrietamiento (por ejemplo longitudinal en terraplenes de escasa altura).

Otro importante resultado mencionado en la Ref.1 se refiere al comportamiento anisotrópico de los suelos activos en cuanto a deformabilidad, cuando se compactan del lado húmedo; ocurre entonces que la deformabilidad vertical es mayor que la horizontal.

en la rama seca, el comportamiento en cuanto a anisotropía es mucho menos sistemático.

La Fig. 4. establece la importancia influencia del método de compactación (comparando en este caso el amasado con el de compactación estática) en las características de contracción y expansión de los suelos finos. La influencia del contenido de agua de compactación destaca también como importante.

Finalmente, la Fig. 5 indica el tipo de relación que se establece entre la presión de expansión que puede generar un suelo compactado y las condiciones de la propia compactación (en este caso compactación estática), corroborándose una vez más que en muchas circunstancias comunes, el empleo de energías de compactación intensas, especialmente asociado a una falta de control en el contenido de agua del proceso, puede generar problemas de deformabilidad muy serios, especialmente en etapas subsecuentes de la vida de la estructura a la que se integre el suelo compactado.

6 QUINTA DISCREPANCIA. LA CREENCIA COMUN ENTRE LOS INGENIEROS DE CAMPO QUE CUNTO MAS SE COMPACTE UN SUELO, MAYOR ES LA RESISTENCIA ADQUIRIDA.

Los comentarios que se harán respecto a este importante tópico enfocarán únicamente a la resistencia a compresión simple o a la resistencia triaxial no drenada, probablemente los dos índices más utilizados en valuaciones relacionadas con obras lineales.

La Fig. 6 (Ref. 4) ejemplifica la información obtenida en el laboratorio en el sentido de que la resistencia a la compresión simple crece como la energía de compactación empleada (impactos, en el caso de la figura) y disminuye substancialmente para grados de saturación del suelo altos; tendencias análogas se manifiestan para todos los métodos de compactación. Se señala también en la misma Ref. 4 que muy altas energías de compactación empleadas en el lado húmedo pueden llegar a producir un tan fuerte remoldeo de la estructura de grumos, que legue a causar una disminución de la resistencia y un aumento de la deformabilidad; este hecho debe relacionarse con el ya mencionado de que el lado húmedo tienden a disiparse las tensiones capilares en el agua entre grumos, favoreciéndose así el mencionado remoldeo y la pérdida de nexos estructurales. Nótese también que el aumento de la resistencia a la compresión simple con la energía de compactación pudiera ser un efecto inicial en el suelo, especialmente si el material ha sido compactado con bajos contenidos de agua, el efecto del aumento de resistencia podría evolucionar a drásticas disminuciones de la misma cuando el suelo absorbiese agua.

El efecto del método de compactación, de la energía empleada y del contenido de agua en la resistencia a la compresión simple se ejemplifica en la Fig. 7 (Ref. 1) para una arcilla activa. Puede verse de nuevo como la resistencia aumenta cuando el contenido de agua de compactación disminuye, si bien para contenidos de agua del orden del óptimo de compactación y mayores esa resistencia vuelve a disminuir.

La misma Ref. 1 hace ver que los resultados son bastante similares para los diferentes métodos de compactación.

En la Ref. 1 hace ver que los resultados son bastante similares para los diferentes métodos de compactación.

En referencia a la también comentada evolución de la resistencia por absorción de agua, son de señalar los resultados mostrados en la Fig. 8 que explican claramente las disminuciones de resistencia que tienen al incrementar la energía de compactación, especialmente aplicada con bajos contenidos de agua.

Las Figs. 9 y 10 (Refs. 3 y 5) muestran el comportamiento típico de suelos arcillosos compactados en prueba triaxial sin consolidación y sin drenaje. Se muestran líneas que unen puntos de igual resistencia en Kg / cm² y para dos presiones de confinamiento en la cámara. Obsérvese en primer lugar que la evolución de la resistencia no drenada es fundamentalmente una función del contenido de agua de compactación, pero debe notarse que sobre todo para la mayor presión de confinamiento, la resistencia correspondiente a cada contenido de agua de compactación es independiente del peso volumétrico alcanzado en el proceso, este efecto se produce también aunque en forma un poco menos notoria para presiones de confinamiento muy pequeña. Lo anterior hace ver una vez más que el aumento de peso volumétrico obtenido con la compactación no siempre refleja en un incremento en la resistencia del material compactado.

El efecto del método de compactación en la resistencia no drenada de los suelos finos aparece abordado por las gráficas de la Fig. 11 (Ref. 2, 3 y 5). El método de compactación actúa en forma importante sobre la estructura a que llega el suelo compactado, y como es lógico e inclusive intuitivo, ésta influye poderosamente en la resistencia alcanzada. El mensaje principal de la Fig.11 es que cualquier análisis de laboratorio para fines de proyecto con materiales compactados deberá utilizar el mismo método de compactación utilizado posteriormente en el campo. Desde este importante punto de vista, las pruebas de compactación de laboratorio más lógicas resultarán ser las de amasado y las de impacto. (Ref. 2 y 4).

7 SEXTA DISCREPANCIA. LAS TECNICAS DE LABORATORIO NO SIEMPRE CONCUERDAN CON LO QUE EL CONOCIMIENTO ACTUAL INDICA.

Según se sabe hoy, el peso volumétrico obtenido con la compactación aumenta con el porcentaje de las partículas gruesas, que hay en el suelo hasta un cierto límite, arriba del cual disminuye; el aumento señalado es tanto más acusado cuanto más variada sea la granulometría de los gruesos. Lo anterior hace ver como objetable una práctica bastante usual de laboratorio, según la cual la fracción retenida en una cierta malla (frecuentemente la de 3/4"), se retira y es remplazada en la muestra por el mismo peso de material de tamaños menores (también frecuentemente entre la 3/4" y la No. 4).

En muchos suelos muy activos y en suelos residuales se manifiestan fuertes tendencias a la formación de grumos cuando se permite su secado, lo que hace variar la granulometría de sus gruesos. No es extraño entonces que los resultados de las pruebas de compactación varíen con cualquier cambio del contenido de agua que suceda durante períodos de tiempo en los cuales el material este almacenado . Este afecto es detalladamente estudiado en la Ref. 1, de la que aquí se toma la Fig. 12. En dicha figura se presentan resultados de dos pruebas de compactación por impactos, una con material previamente secado al ambiente y otra con el material natural sin secado previo. El

material sin secado previo. El material sin secado previo muestra pesos volumétricos menores para cualquier contenido de agua de compactación.

En la misma referencia se hace ver que las máximas resistencias a la compresión simple de ambas muestras son similares, si bien en el material sin secado ocurren con contenidos de agua mayores. Estos resultados han sido reportados por otros suelos volcánicos residuales (ref. 1).

El secado previo de un material residual antes de someterlo a una manipulación normal para la realización de pruebas de compactación en el laboratorio, parece inducir (ref. 1) un efecto de endurecimiento en los grumos por perconsolidación debido a succión y hace aparecer la posibilidad de cementación por depósito de sales. Los suelos con menor contenido de agua de almacenamiento muestran sistemáticamente mayores pesos volumétricos en la rama seca y resistencias a la compresión simple más grandes cuanto menor sea el valor del contenido del agua al fin de dicho periodo de almacenamiento. Ello es debido a que la compactación se hace menos efectiva cuanto más secos estén los grumos (en consecuencia, más endurecidos) y ello produce mayor resistencia a la compresión simple y mayor peso volumétrico.

Todo lo anterior indica la necesidad de controlar la humedad adquirida por el suelo durante el periodo de almacenamiento anterior a la compactación.

La propia Ref. 1 hace ver que también influyen los resultados de la compactación el tiempo de curado, o sea el que transcurre entre el momento en que se añade agua a la muestra y el de su compactación, durante el cual se permite una distribución uniforme del agua. Se ha visto que las mayores diferencias en el peso volumétrico y en la resistencia a la compresión simple se presentan cuando varía el tiempo de curado, en la rama seca de la curva de compactación. Parece conveniente fijar el tiempo de curado; en la Ref. 1 se propone un día, atomizando el agua por añadir al material almacenado a punto de niebla.

El tiempo de reposo, que transcurre entre la compactación y el inicio de las pruebas de resistencia parece ser también de importancia en los resultados obtenidos y, por ende, debe ser también controlado, lo que no es práctica usual, para obtener pruebas repetibles con resultados comparables. En la ref 1. se define una relación R_q como el cociente de la resistencia a la compresión simple determinada en muestras con un contenido de agua y tiempo de reposo t y la misma resistencia con el mismo contenido de agua para un tiempo de reposo de 30 minutos. se reporta que R_q puede llegar a ser del orden de 2.5 para 500 días de tiempo en reposo, el efecto, es tanto mayor cuanto mayor sea el contenido de agua de compactación. También la deformabilidad del suelo varía notablemente con el tiempo de reposo.

REFERENCIAS

1. Alberro, J., Marsal R. J. y Mendoza, M.J.- Comportamiento de Suelos Cohesivos Compactados.- Publicación No. 493 del Instituto de Ingeniería de la UNAM, México, D. F.- 1995
2. Marsal, R. J. y Reséndiz, D.- Prensas de Tierra y Enrocamiento.- Editorial Limusa.- México, D. F.- 1975 (De particular interés al capítulo 9)
3. Rico, A y del Castillo H.- La ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres.- Tomo Y.- Capítulo IV.- Editorial Limusa.- México D. F.- 1984.
4. Mendoza, M- J- Enfoques Recientes en la Compactación de Suelos.- Trabajo elaborado para el Instituto Mexicano del Transporte en 1991.
5. Rico, A. y del Castillo H.- Consideraciones sobre Compactación de Suelos en Obras de Infraestructura de Transporte.- Publicación del Instituto Mexicano del Transporte.- Querétaro, 1992.

FIGURAS

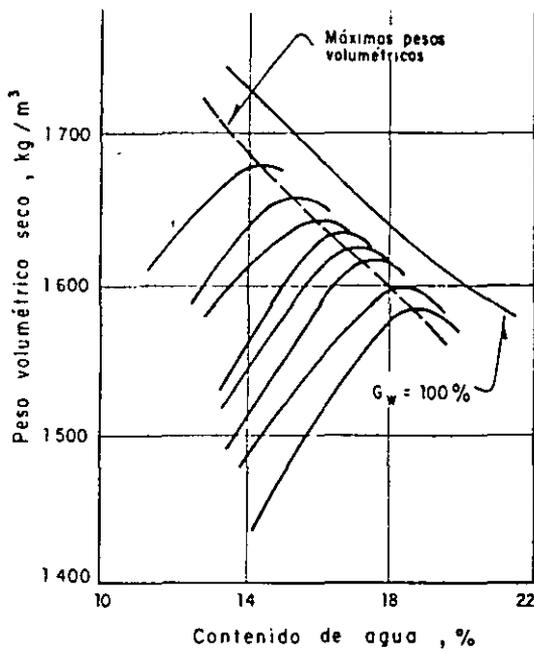
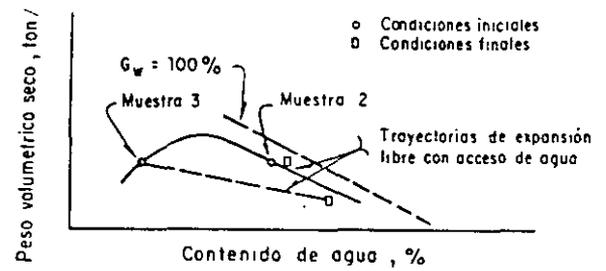
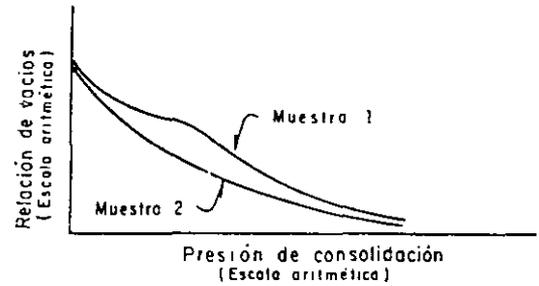


Fig 1. Diagrama cualitativo de γ_d vs. w para diversas energías de compactación.



a) Condiciones de compactación y trayectorias de expansión libre



b) Curvas relación de vacíos - presión

Fig 3. Compresibilidad y expansividad de un suelo arcilloso compactado a una misma relación de vacíos con contenidos de agua a ambos lados del óptimo.

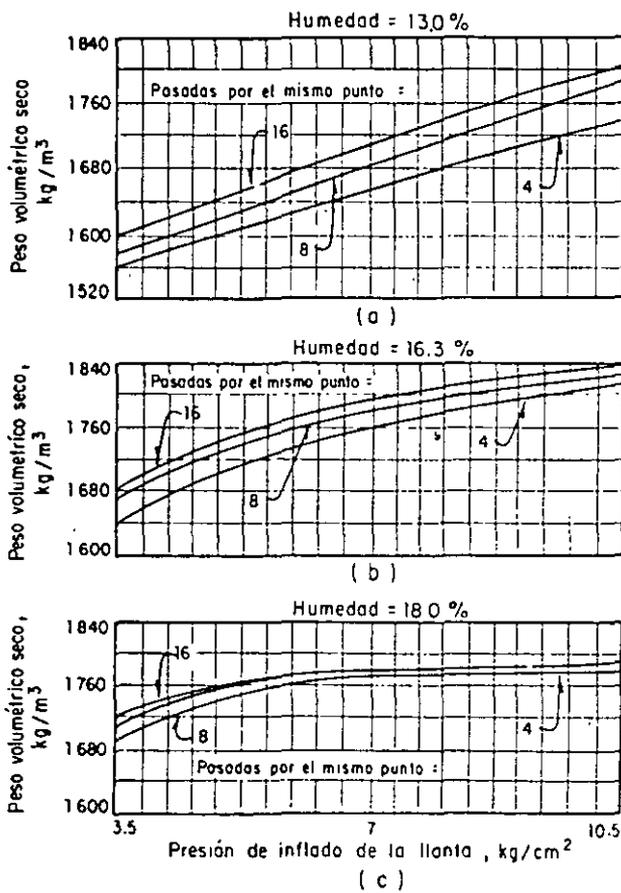


Fig 2. Efecto de la presión de inflado, del número de pasadas y de la humedad de compactación.

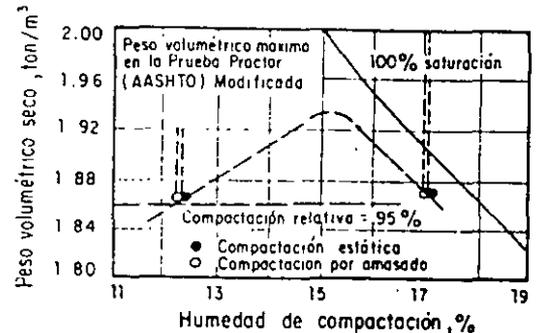
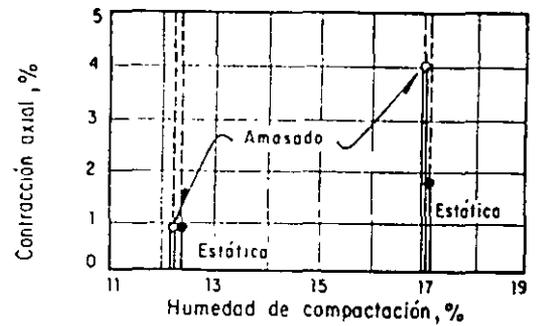
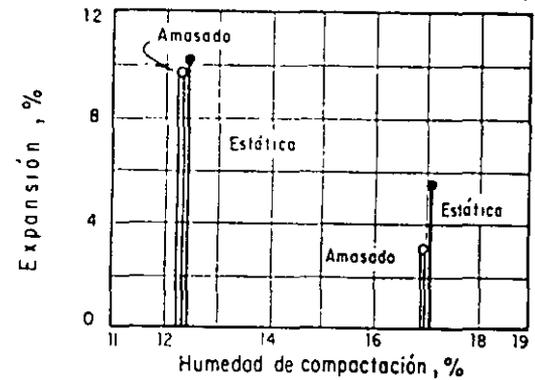


Fig 4. Expansión y contracción de una arcilla arenosa compactada estáticamente y por amasado.

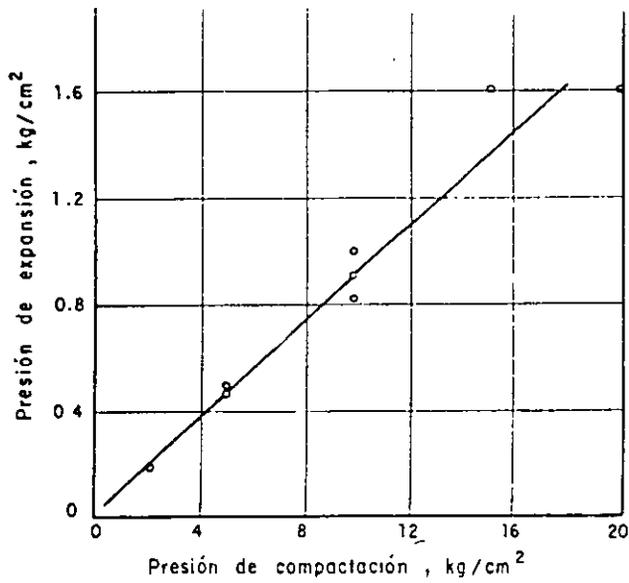


Fig 5. Relación entre presión estática de compactación y la presión de expansión en una arcilla.

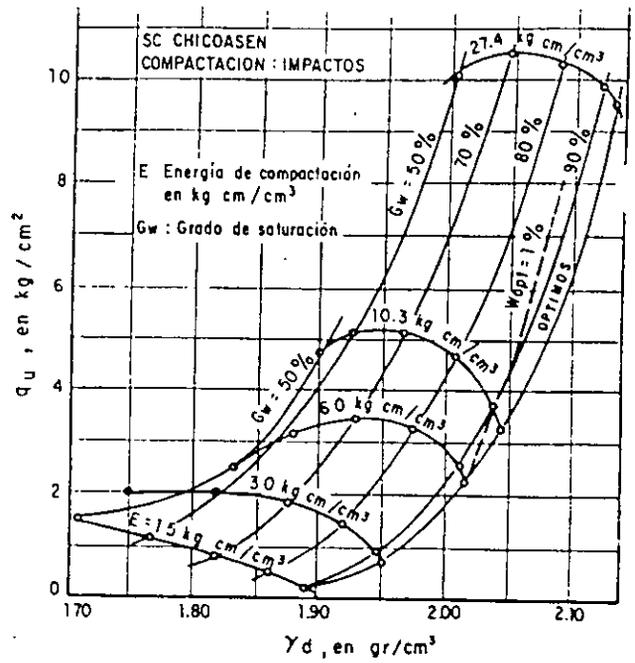


Fig 6. Resistencia no confinada en función de γ_d para valores diferentes de G_w .

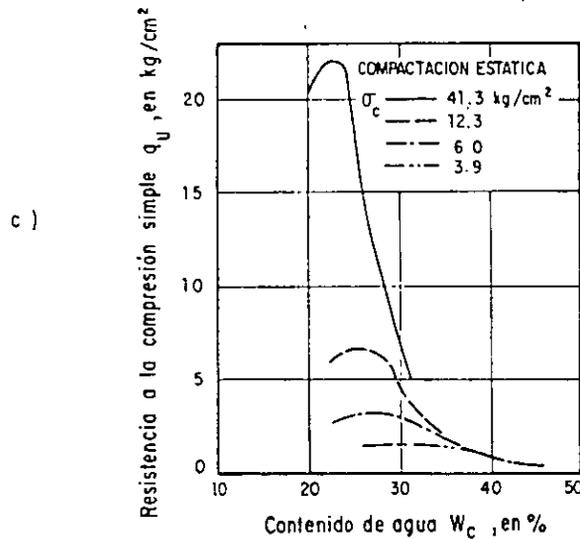
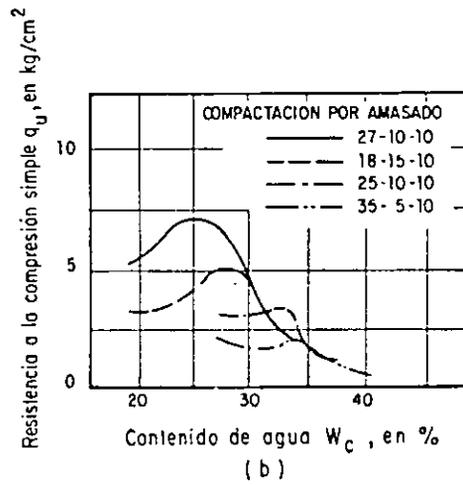
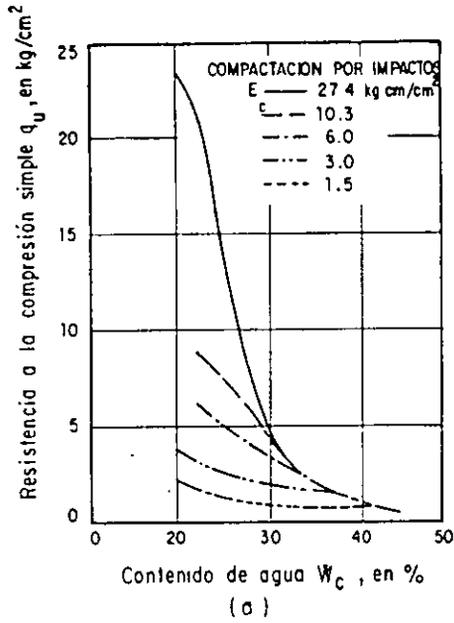


Fig 7. Resistencia a la compresión simple q_u , para distintos tipos de compactación, en función del contenido de agua de compactación w_c (Ref. 1).

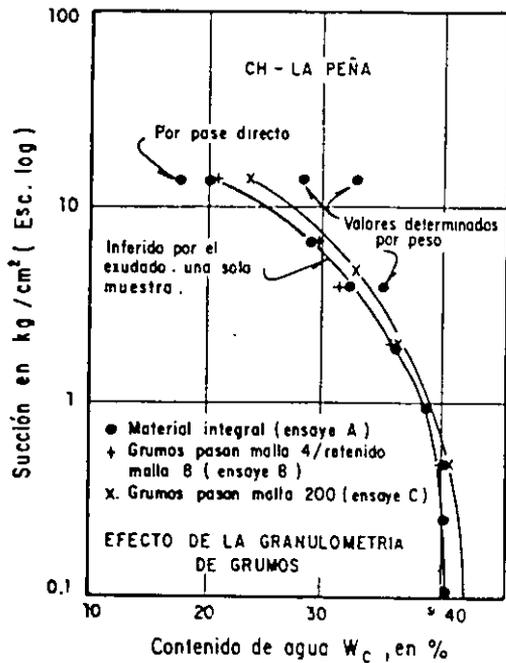


Fig 8. Ensayes de succión en un suelo fino activo [CH] (Ref. 1).

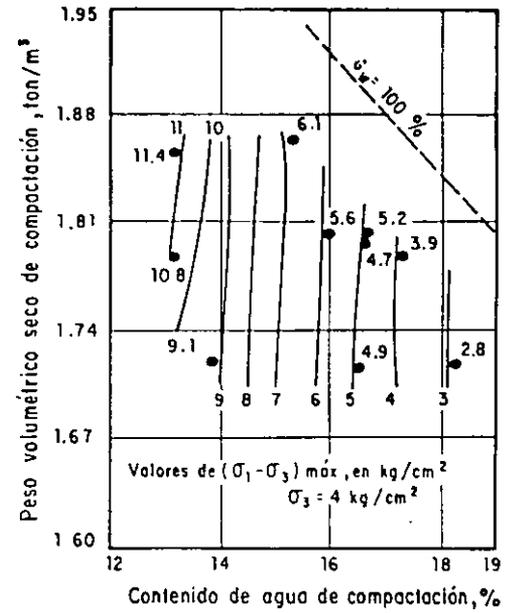


Fig 9. Líneas de igual resistencia a la compresión en prueba rápida, sin saturación previa y con presión confinante de 4 kg/cm^2 .

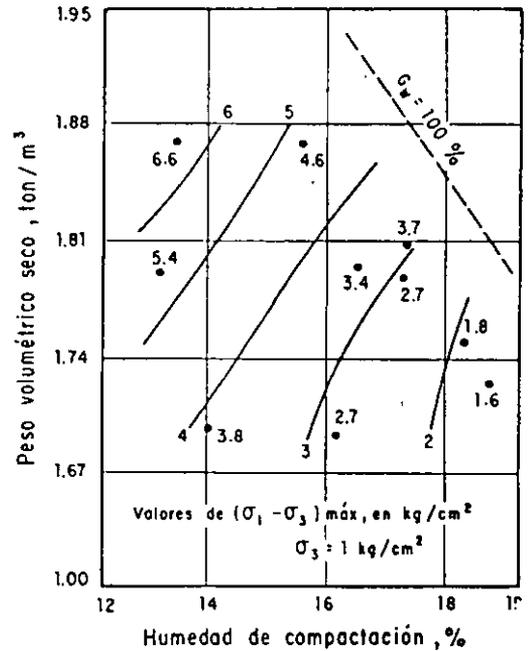


Fig 10. Líneas de igual resistencia a la compresión en prueba rápida, sin saturación previa y con presión confinante de 1 kg/cm^2 .

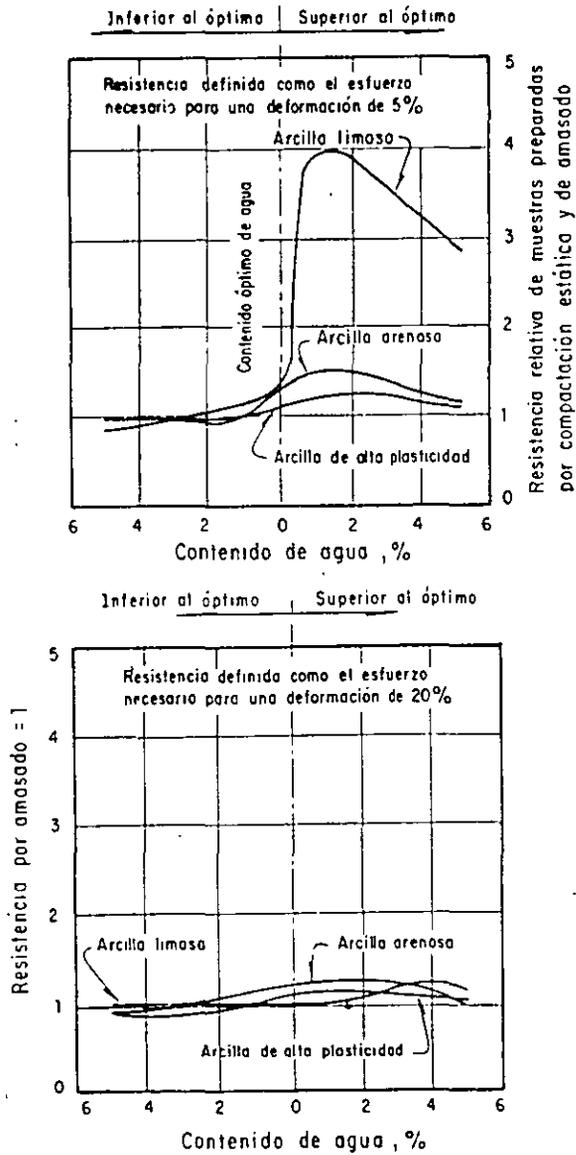


Fig 11. Efectos de procedimientos de compactación en la resistencia en prueba rápida (saturación previa de muestras compactadas a mismos γ_d y w) con compactación estática y de amasado.

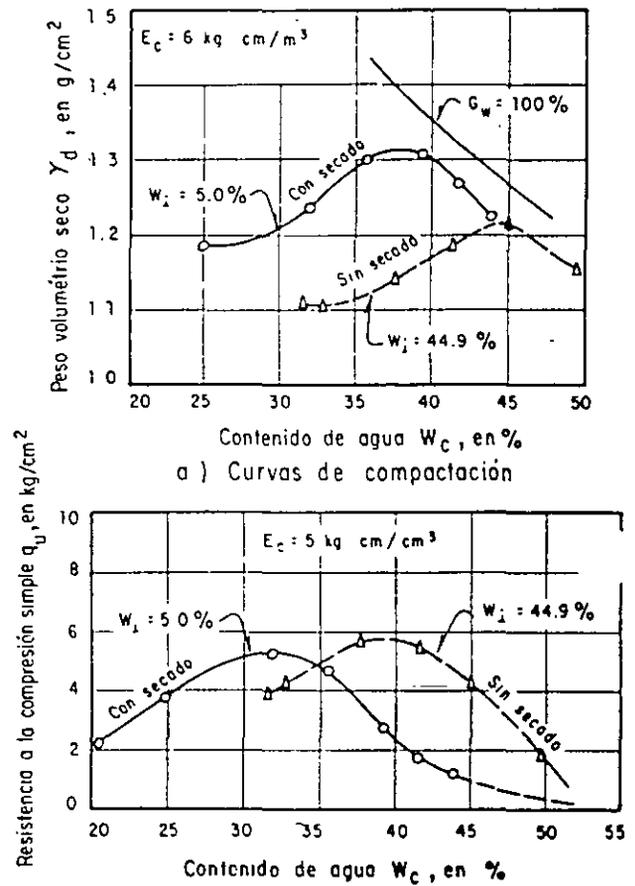
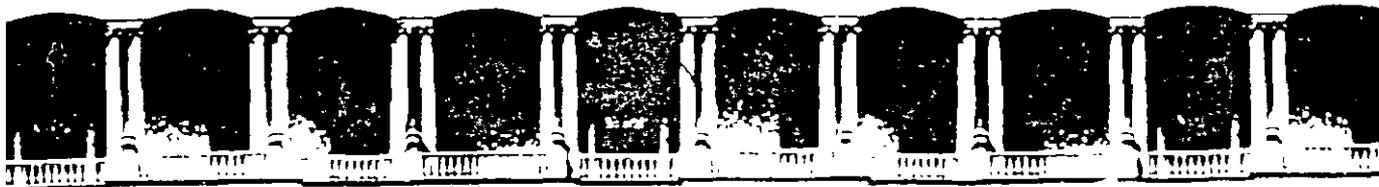


Fig 12. Efecto del contenido de agua inicial en los resultados de la compactación. (Ref. 1).



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS I

TEMA

DEFORMABILIDAD DE SUELOS

**CONFERENCISTAS
ING. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN
M. en I. CARMELINO ZEA CONSTANTINO
PALACIO DE MINERÍA
MAYO 2000**

6.1 INTRODUCCION

En el diseño de una cimentación, el ingeniero de mecánica de suelos debe estimar el comportamiento que tendrá dicha cimentación ante las diferentes condiciones de carga a que estará sujeta.

Básicamente la verificación del comportamiento comprende las siguientes situaciones:

- a) estados límite de falla
- b) estados límite de servicio

En esta oportunidad nos ocuparemos de los estados límite de servicio, los cuales se refieren a las diferentes condiciones en que trabajará la estructura y cimentación durante su vida útil, en la que estará sujeta a cargas permanentes tales como la carga muerta, la carga viva, etc..., y a cargas transitorias debidas a viento o sismo.

La aplicación de las diferentes condiciones de carga a la cimentación y de ésta al subsuelo provocará cambios en el estado de esfuerzos del suelo y consecuentemente deformaciones. Un diseño adecuado de la cimentación será aquél que limite los movimientos de la estructura a valores compatibles con el tipo de estructura o con su entorno.

En resumen, el objetivo del ingeniero de cimentaciones será el de mantener los hundimientos totales y diferenciales de la estructura y su cimentación por abajo de los permisibles, establecidos por las autoridades municipales o por necesidades propias de la obra.

Para poder estudiar el comportamiento de la cimentación se requieren conocer, con suficiente precisión, las propiedades esfuerzo-deformación-tiempo de los diferentes estratos que constituyen el subsuelo y que se vean afectados por las cargas que la cimentación les transmite, sean éstas permanentes o transitorias.

La determinación de las propiedades esfuerzo-deformación-tiempo para condiciones dinámicas de carga forma parte de otra sesión del curso, por lo que únicamente nos referiremos a la determinación de los parámetros de compresibilidad del suelo para condiciones estáticas de carga.

Cuando se pretende determinar la compresibilidad de un suelo se trata de representar las condiciones en que se encuentra en el campo, tales como nivel medio de esfuerzos, compacidad, grado de saturación etc.

Las propiedades mecánicas de compresibilidad pueden obtenerse mediante pruebas de compresión en la cámara triaxial o en el odómetro. Se llevan acabo en la cámara triaxial en aquellos materiales tales como arenas limo arcillosas, limos arcillosos o arcillas limo arenosas en las que el efecto del tiempo no es muy significativo. Para estos materiales se obtienen curvas de comportamiento que permiten calcular los módulos de deformación⁽¹⁾.

Para suelos finos sean éstos saturado o no, la determinación de las propiedades mecánicas de compresibilidad se llevan acabo mediante pruebas en el odómetro o consolidómetro. En la figura 1 se muestra en forma esquemática un instrumento de este tipo.

6.2 Pruebas de compresión en el odómetro

El comportamiento de suelos finos semisaturados del tipo expansivo o colapsible, puede estudiarse mediante pruebas de compresión en el odómetro.

Este tipo de suelos es muy susceptible a los cambios de humedad, provocándose la modificación en su estructura. Esto se traduce, en el caso de suelos expansivos, en hinchamientos y, en suelos eólicos del tipo loessial, en colapsos súbitos. Ambos problemas pueden ser de consecuencias graves para la cimentación y superestructura.

Las figuras 2 y 3, muestran el comportamiento típico de estos materiales.

La potencia de expansión o colapso queda definida por la expresión:

$$\Delta\varepsilon = \pm \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (1)$$

donde:

$\Delta\varepsilon$: cambio en la deformación unitaria debido a la saturación del material para un nivel de esfuerzos dado

Δe : cambio en la relación de vacíos

e_0 : relación de vacíos del material en estado natural para el mismo nivel de esfuerzos

Conocido el espesor del estrato (d), con potencia de expansión o colapso y determinando el esfuerzo efectivo actuante puede calcularse la expansión o colapso con la expresión:

$$\Delta\delta = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \cdot d \quad (2)$$

6.3 Pruebas de consolidación unidimensional en suelos finos saturados

Cuando se somete un espécimen de suelo fino saturado como las arcillas, arcillas limosas y limos arcillosos a un esfuerzo de compresión en donde la deformación lateral está restringida, el cambio de volumen no ocurre inmediatamente, ya que primero debe ser expulsada el agua del poro. Por tanto, debe transcurrir tiempo para que se verifique la deformación. A este fenómeno se le conoce como proceso de consolidación.

Durante el proceso de consolidación se generan cambios volumétricos debidos a dos fenómenos que ocurren simultáneamente; el primero se conoce como retardamiento hidrodinámico o consolidación primaria, provocado por la expulsión del agua libre o gravitacional contenida en los poros del material; el segundo, conocido también como

consolidación secundaria, se debe a la deformación viscosa intergranular producida por el movimiento relativo entre sus granos ⁽²⁾.

La teoría de consolidación descubierta por K. Terzaghi (1925) explica exclusivamente el retardamiento hidrodinámico. La teoría de viscosidad intergranular descubierta por L. Zeevaert explica el incremento en la deformación cuando el efecto hidrodinámico se ha disipado.

Al ingeniero de mecánica de suelos le interesa encontrar un procedimiento que le permita el cálculo del cambio volumétrico de un suelo a través del tiempo sometido a un incremento de presión. Esto ha llevado a la determinación de leyes fenomenológicas que explican el comportamiento de un suelo saturado.

Al final de estas notas se incluye el procedimiento completo para ejecutar una prueba de consolidación según lo establece la ASTM. En dicha norma se explica con detalle el proceso de consolidación y se establecen fórmulas de interpretación para la consolidación secundaria, las cuales se aceptan ampliamente.

Se considera sin embargo, que una interpretación más precisa del comportamiento del suelo es la que establece el profesor L. Zeervaert con su teoría de viscosidad intergranular.

De acuerdo con esta teoría, la ley fenomenológica que controla la deformación volumétrica unitaria de un material fino saturado, que muestra un comportamiento como el que indica la figura 4, es como sigue ⁽³⁾ :

$$\Delta \varepsilon_v = m_v \cdot \Delta p \{ F(T_v) + \beta \log(1 + \xi T_v) \} \quad (3)$$

donde:

| | |
|--------------------------------|---|
| m_v : | coeficiente de compresibilidad volumétrica unitario para la compresión primaria |
| Δp : | incremento de presión |
| $F(T_v)$: | función de Terzaghi |
| β : | factor que mide la magnitud relativa del fenómeno viscoso intergranular |
| T_v : | factor tiempo de la teoría de consolidación de Terzaghi |
| ξ : | factor adimensional que modifica el valor de T_v |

La determinación de los parámetros en el laboratorio se obtiene transformando la ecuación anterior a la forma:

$$\delta_t = \delta_v \cdot F(T_v) + C_t \log\left(1 + \frac{t}{\tau}\right) \quad (4)$$

En la figura 4 se explica el significado de los términos no conocidos.

Para cada una de las curvas de consolidación se determinan los parámetros m_v , C_v , β y ξ , los cuales se grafican para el nivel medio de esfuerzos $\sigma+\sigma/2$, tal como se muestra en la figura 5.

Para la aplicación de la expresión (3) en un caso práctico se debe tomar en cuenta la rapidez con que se aplica la carga, ya que para tiempos de consolidación menores al tiempo de construcción puede ser importante la diferencia entre aplicación rápida de la carga y aplicación lineal, esto es, durante un tiempo de construcción.

$$\Delta \sigma = \Delta \sigma_c / t_c$$

Cuando se aplica la carga de manera inmediata la expresión (3) es la que se utiliza para el cálculo de hundimientos con el tiempo.

Si se considera aplicación lineal de la carga las expresiones utilizadas son las siguientes:

Para $0 < t < t_c$

$$\Delta \epsilon_v = m_v \cdot \Delta \sigma_c \cdot \frac{T_v}{T_{vc}} \left[\Phi(T_v) + 0.433 \left(1 - \frac{\log(1 + \xi T_v)}{\xi T_v} \right) \right] \quad (5)$$

donde:

$$\Phi(T_v) = \left\{ 1 - \frac{1}{T_v} \sum_{m=0}^{m=8} \frac{32}{(2m+1)^4 \Gamma^4} \left(1 - e^{-\frac{(2m+1)^2 \Gamma^2}{4} T_v} \right) \right\} \quad (6)$$

para $t > t_c$

$$\Delta \varepsilon_v = m_v \cdot \Delta \sigma_c \cdot \left[F(T_v - T_{01}) + \beta \log(10^{A_{vc}} + \xi(T_v - T_{vc})) \right] \quad (7)$$

donde

$$F(T_v) = \left\{ 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{8}{(2m+1)^2 \Pi^2} e^{-\frac{(2m+1)^2 \Pi^2}{4} T_v} \right\} \quad (8)$$

y

$$A_{vc} = 0.43 - \frac{\log(1 + \xi T_{vc})}{\xi T_{vc}} \quad (9)$$

el valor de T_{01} se obtiene igualando las funciones

$$\Phi(T_{vc}) = F(T_{vc} - T_{01}) \quad (10)$$

para $t = t_c$. La figura 6 muestra las funciones $F(T_v)$ y $\Phi(T_v)$ en forma gráfica, con las que puede determinarse el valor de T_{01} .

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo de hundimientos considerando la aplicación de la carga en forma inmediata y linealmente; la figura 7 muestra gráficamente la diferencia en el hundimiento en cada caso, los datos para el cálculo fueron los siguientes:

$$\begin{aligned} d &= 500 \text{ cm} \\ \Delta \sigma_c &= 0.3 \text{ kg/cm}^2 \\ t_c &= 1 \text{ año} \\ m_v &= 0.030 \text{ cm}^2 / \text{kg} \\ C_v &= 0.0098 \text{ cm}^2 / \text{seg} \\ \beta &= 0.25 \\ \xi &= 0.46 \end{aligned}$$

el estrato se considera drenado por los dos lados, por lo que $d = 2H$

$$T_{vc} = \frac{C_v}{H^2} t_c = \frac{0.0098}{(250)^2} \cdot 3.15 \times 10^7 = 4.939$$

de la (6)

$$\Phi(T_{vc}) = 0.9326 = F(T_{vc} - T_{01})$$

$$T_{vc} - T_{01} = 1.0080 \quad \text{y} \quad T_{01} = 3.9246$$

De la (9)

$$A_{vc} = 0.2034$$

Luego las expresiones (3), (5) y (7) quedan como sigue:
aplicación inmediata de la carga

$$\delta_t = 4.5 \cdot \left\{ F(T_v) + 0.25 \log(1 + 0.46T_v) \right\}$$

Y para aplicación lineal.

$$0 < t < t_c$$

$$\delta_t = 0.911T_v \left\{ \Phi(T_v) + 0.1075 \left(1 - \log \frac{1 + 0.46T_v}{0.46T_v} \right) \right\}$$

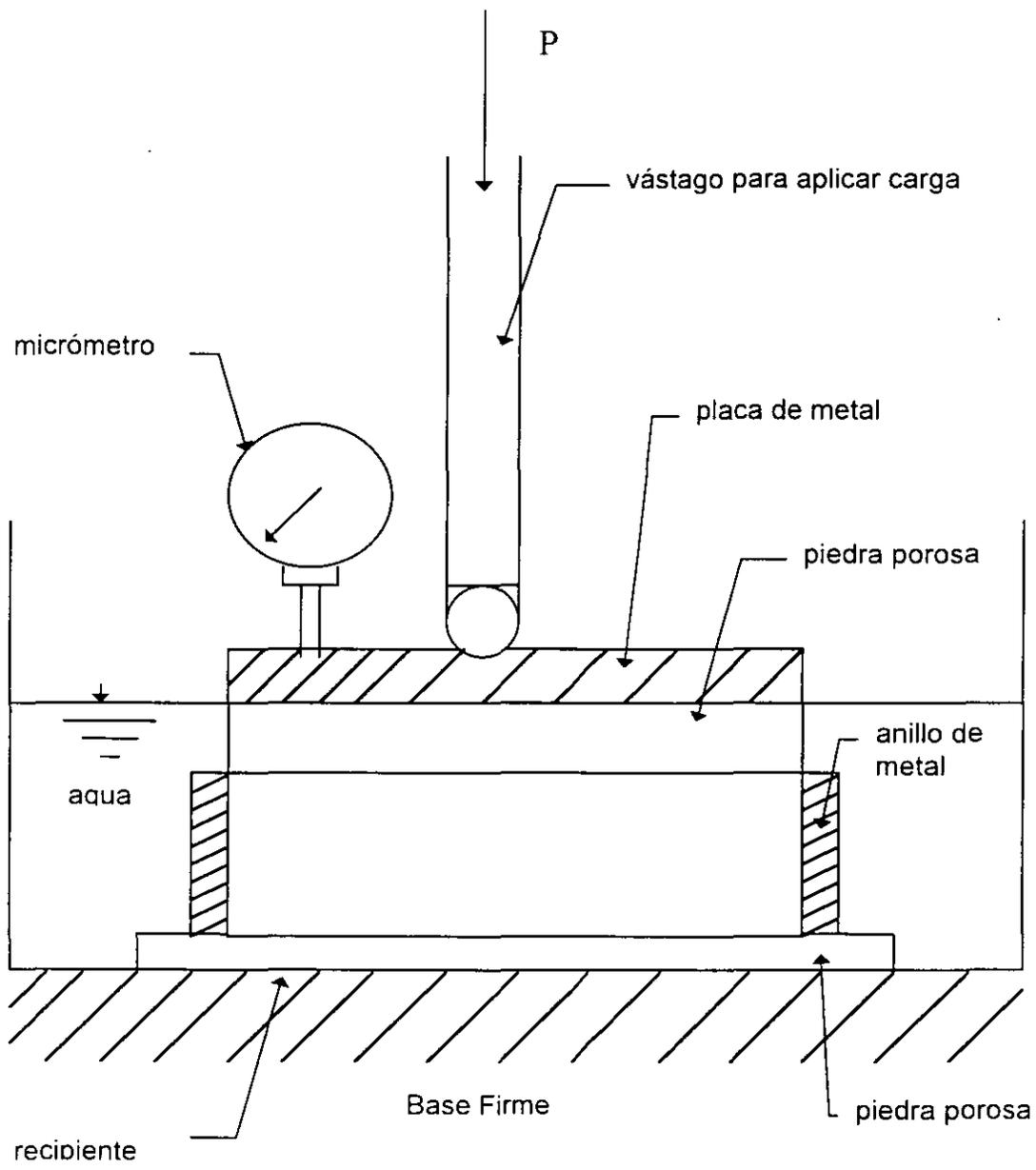
$$t > t_c$$

$$\delta_t = 4.5 \cdot \left\{ F(T_v - 3.9246) + 0.25 \log(1.5973 + 0.46(T_v - 4.9392)) \right\}$$

REFERENCIAS

- 1.- Foundations Engineering for Difficult Subsoil Conditions.
L. Zeevaert Van Nostrand Reinhold 1973, pags. 62 - 70
- 2.- Propiedades Cuantitativas de los Materiales del Subsuelo.
Tomo II . Apuntes de Mecánica de Suelos por L. Zeevaert 1966.
Art. III.8.1 a III.8.3
- 3.- Viscosidad Intergranular en Suelos Finos Saturados.
L. Zeevaert. División de Estudios de Posgrado,

Facultad de Ingeniería.



ODOMETRO

Tomado de ref. 2

FIG.1

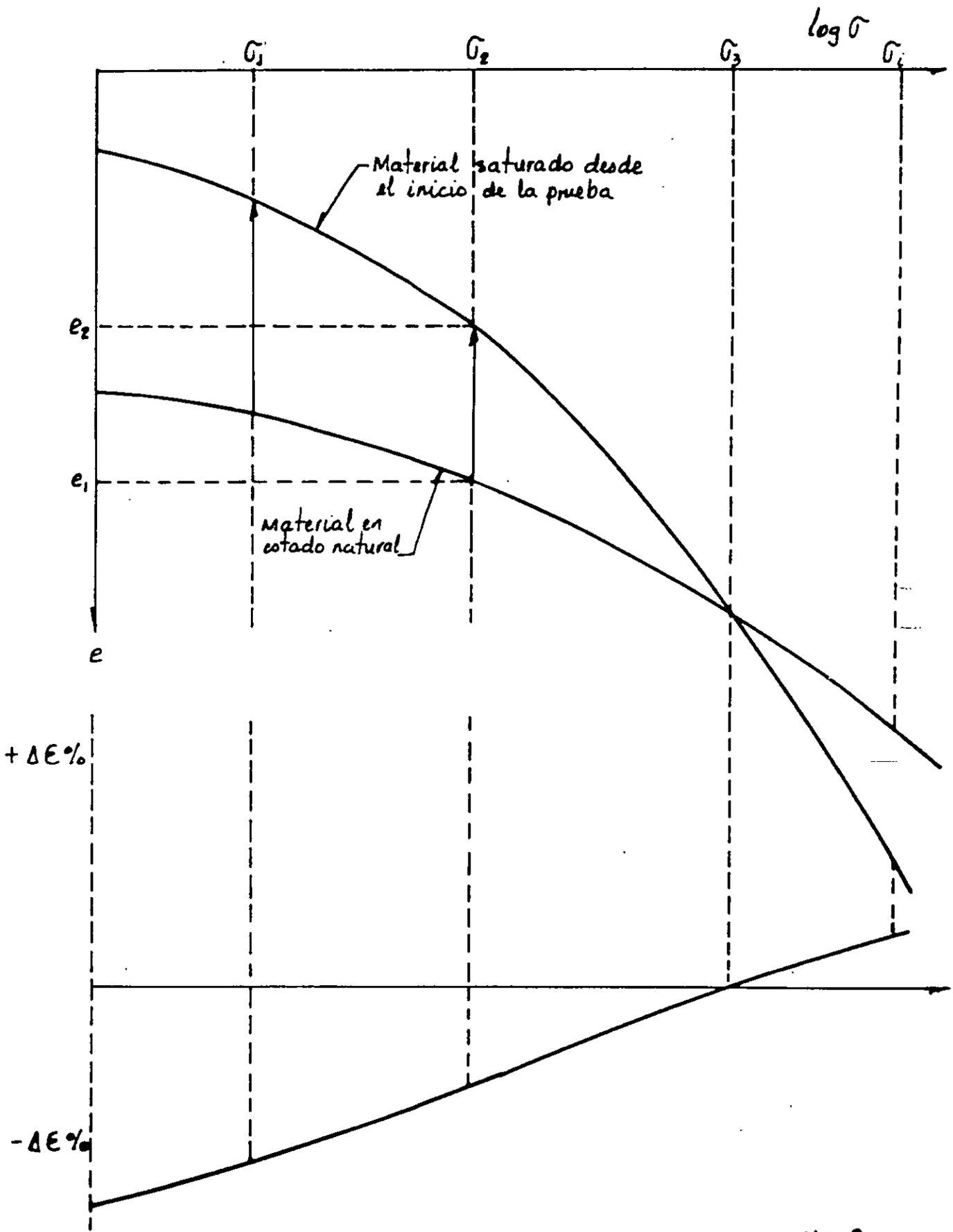


FIG. 2

Tomado de ref. 2

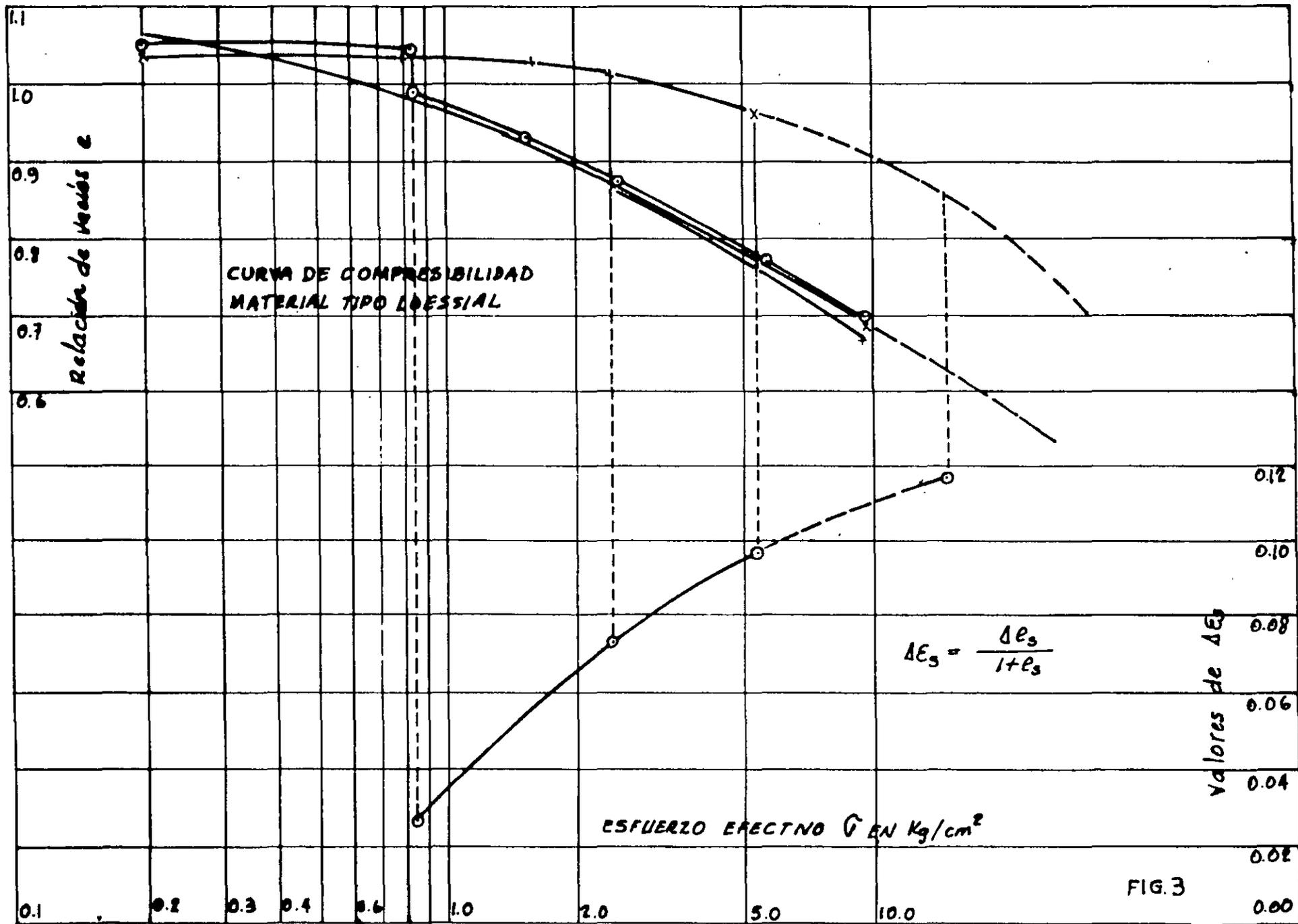
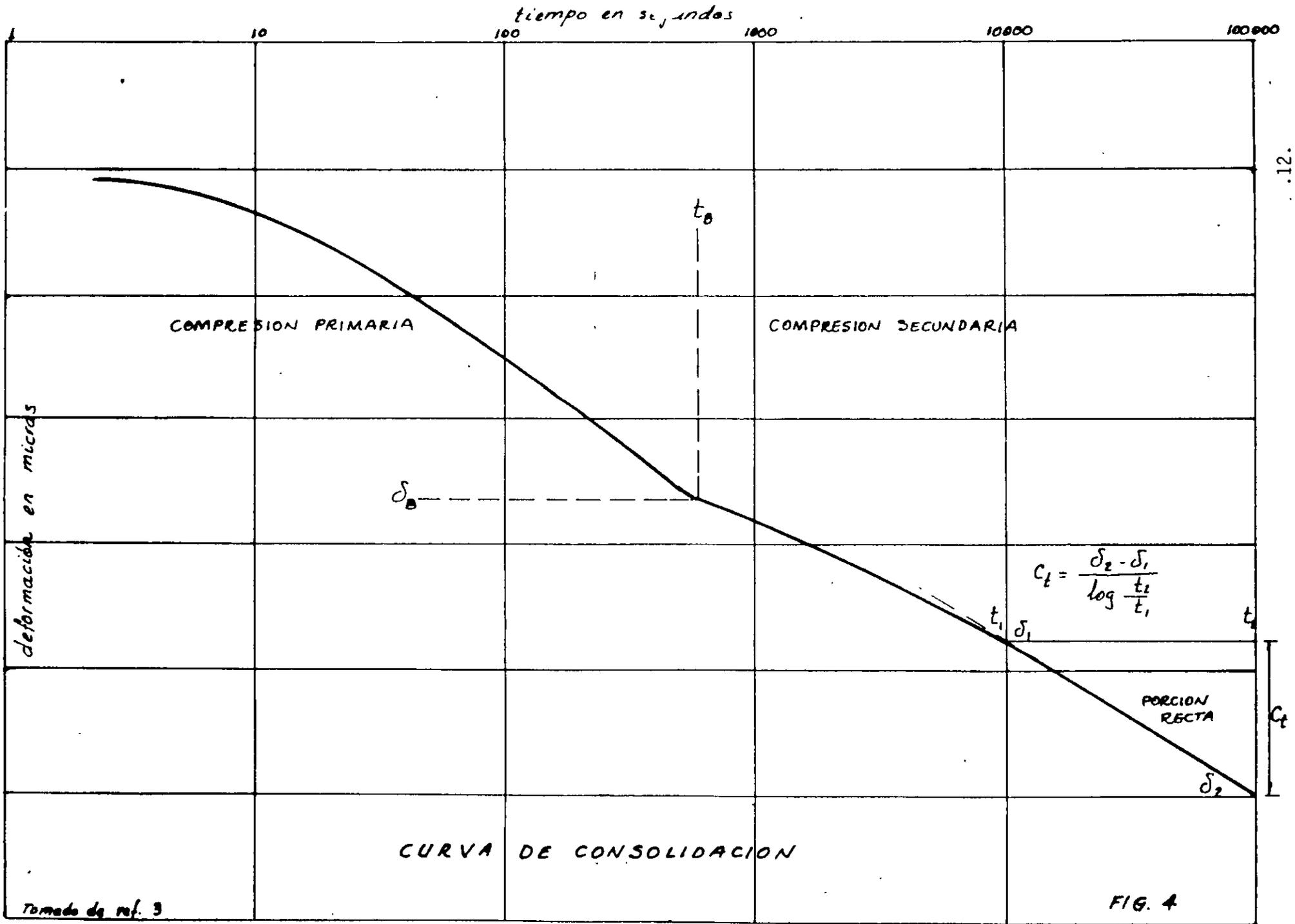


FIG. 3



PARAMETROS DE COMPRESIBILIDAD Y CONSOLIDACION

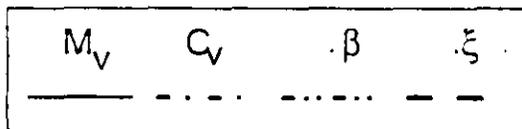
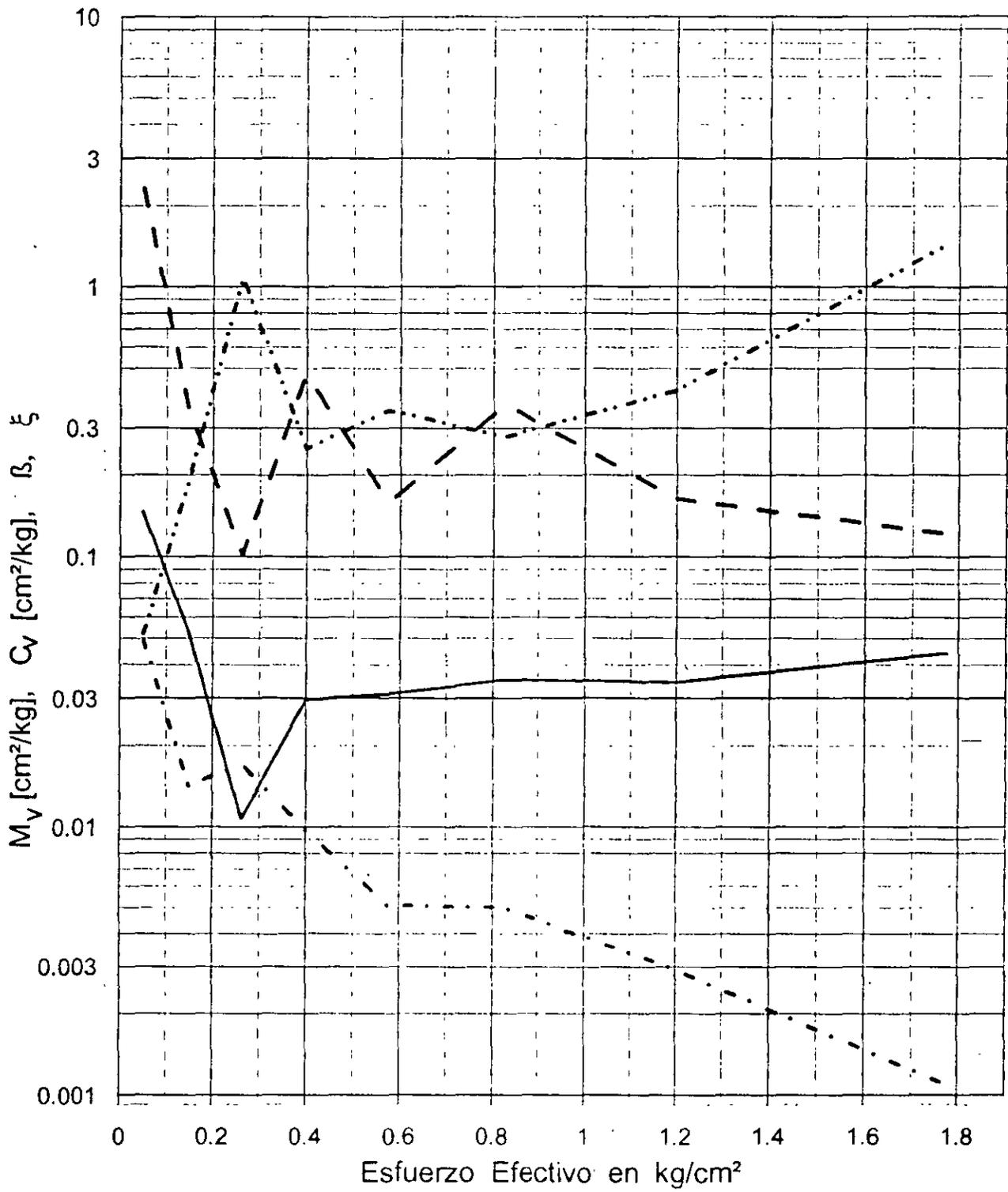


FIGURA No. 5

CURVAS HUNDIMIENTO - TIEMPO

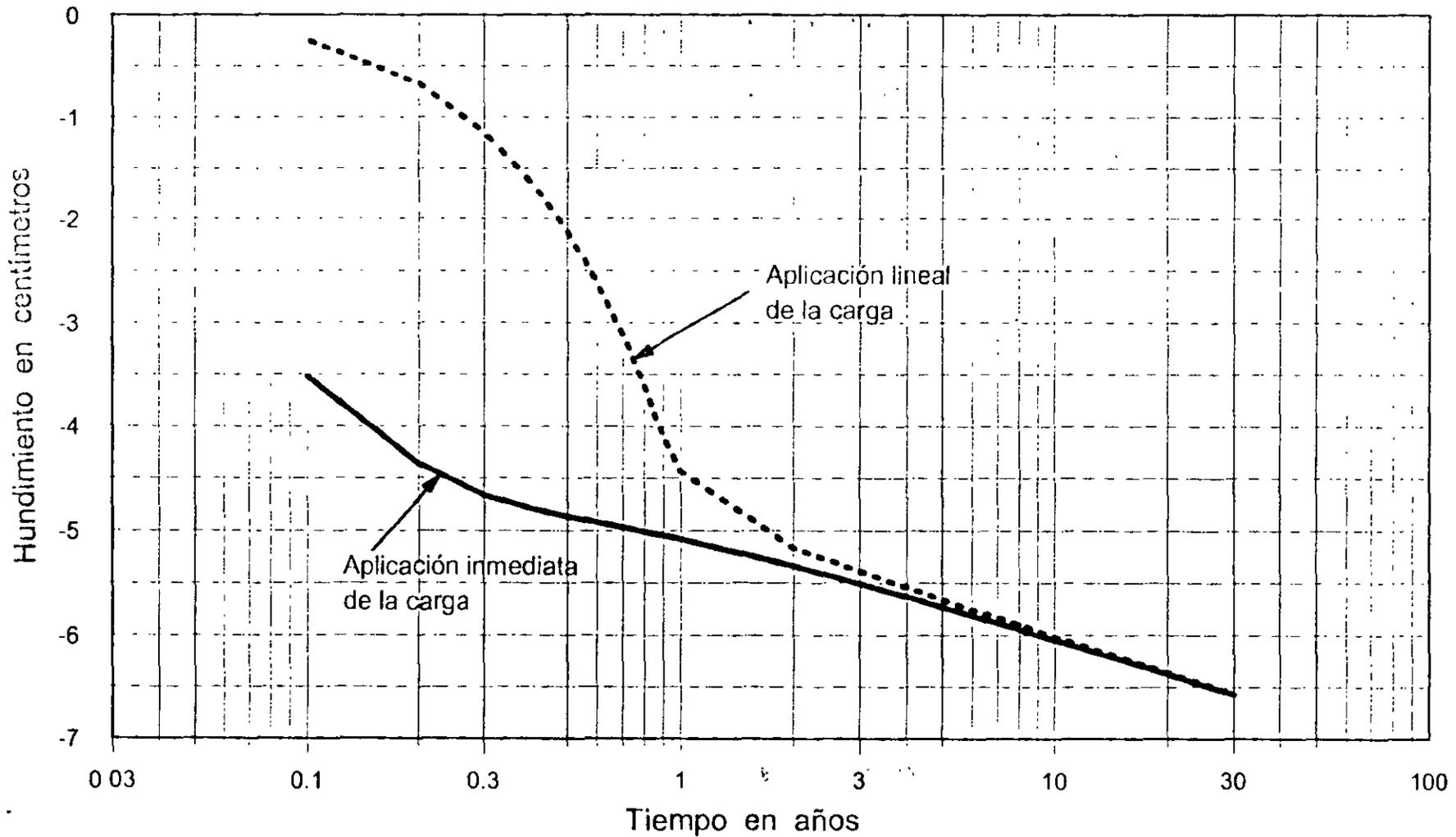


FIGURA No. 6



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS I

TEMA

SUELOS FINOS SATURADOS

**CONFERENCISTAS
ING. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN
M. en I. CARMELINO ZEA CONSTANTINO
PALACIO DE MINERÍA
MAYO 2000**

VISCOSIDAD INTERGRANULAR EN SUELOS FINOS SATURADOS

Leonardo Zeevaert Wiechers

1ª edición: octubre 1984

D - 59

**División de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería
U.N.A.M.**

VISCOSIDAD INTERGRANULAR EN SUELOS

FINOS SATURADOS

L. Zeevaert*

SINOPSIS

Los sedimentos finos saturados como arcillas limosas y limos arcillosos que se encuentran en ambientes lacustres, marinos, lagunas marginales y llanuras de inundación cerca de la desembocadura de los ríos presentan generalmente un comportamiento "*viscoso intergranular*" comúnmente conocido como compresión secundaria.

Cuando el subsuelo se encuentra altamente estratificado con intercalaciones de arena, la compresión primaria debido al fenómeno hidrodinámico de la consolidación se verifica rápidamente, mostrándose más evidente la compresión secundaria. El ingeniero de cimentaciones no puede ignorar en estos casos el fenómeno de compresión secundaria, ya que los desplazamientos diferidos por el efecto de la viscosidad intergranular pueden ocasionar hundimientos totales y diferenciales de la cimentación, pudiendo dañar el proyecto en cuestión.

El autor ha investigado durante varias décadas el fenómeno de la viscosidad intergranular. En este trabajo se ofrece una mejor interpretación de la teoría expuesta con anterioridad, ⁽¹⁾ así como la determinación de los parámetros que intervienen en dicha teoría.

* Profesor Sección de Mecánica de Suelos. División de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.

INTRODUCCION

El suelo se encuentra en la naturaleza con un determinado estado de esfuerzos efectivos y presión hidráulica. Al ser colocado en el odómetro para efectuar una prueba de compresibilidad, éste es aliviado del estado de esfuerzos y presiones hidráulicas a la que estaba sometido⁽²⁾. Al ser cargado en el odómetro, se obtiene la recompresión del suelo como indica la rama plana de la curva de compresibilidad (fig. 1). Cuando se rebasa el "esfuerzo crítico" de compresión confinada σ_b se observa un quiebre en la curva de compresibilidad el cual se origina por la falla interna de la estructura del suelo al alcanzarse su resistencia al esfuerzo cortante. Teóricamente, el quiebre puede valorizarse por medio de la siguiente ecuación.

$$\sigma_b = \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} (2c) \quad (1)$$

En donde ν representa el valor de la relación de Poisson en el momento del quiebre y c es la resistencia al esfuerzo cortante del suelo. El valor de ν en el quiebre de la curva tiende a ser del orden de 0.25, o bien $\sigma_b / 2c = 1.5$.

La rama inclinada de la curva de compresibilidad representa la compresión del suelo para una nueva condición estructural impuesta por el confinamiento que proporciona el anillo del odómetro. Las deformaciones volumétricas unitarias en esta rama de la curva de compresibilidad, cerca del quiebre, son grandes comparadas con las de la curva antes del esfuerzo crítico σ_b (fig. 1). En este tipo de suelos la rama inclinada no debe usarse para diseño si se quieren evitar fuertes desplazamientos verticales.

En el rango de los esfuerzos de la compresión las curvas de consolidación muestran la configuración que indica la fig. 2. Dicha configuración depende del coeficiente de consolidación del suelo c_v , de la viscosidad intergranular de éste, del espesor del estrato y de las condiciones de drenado. La magnitud de la viscosidad intergranular es, sin embargo, una función importante del nivel de esfuerzos cortantes que se generan durante la prueba del odómetro.

El objetivo del trabajo que se presenta se limita a efectuar la confrontación de la teoría que se expone con los resultados de pruebas del odómetro para curvas de consolidación realizadas a niveles de esfuerzos menores del esfuerzo crítico.

CONSIDERACIONES TEORICAS

La teoría se establece por medio de dos hipótesis fundamentales, ⁽¹⁾ a saber:

- 1) El suelo esta constituido por dos estructuras básicas, la primera esta formada por granos microscópicos carentes de cohesión, y la segunda por flóculos de granos submicroscópicos que forman aglomeraciones de minerales de arcilla.

- 2) Ambas estructuras se encuentran saturadas con agua. La primera representa la compresión primaria, y la segunda, un comportamiento altamente viscoso intergranular o compresión secundaria debido a las fuerzas cortantes que se originan en los contactos intergranulares (fig. 3).

Al someterse el suelo a un incremento de carga unitaria Δp se origina un cambio volumétrico de la estructura primaria $\Delta \varepsilon_{v1}$, y de la secundaria $\Delta \varepsilon_{v2}$. Es evidente que el cambio total por el efecto de la compresión de las dos estructuras consideradas será:

$$\Delta \varepsilon_v = \Delta \varepsilon_{v1} + \Delta \varepsilon_{v2} \quad (2)$$

Dichos cambios volumétricos son retardados por el fenómeno hidrodinámico de la consolidación. Para analizar el fenómeno físico que se presenta usaremos dos modelos geológicos.

- a) La compresión primaria se analiza por medio del modelo de Kelvin, el cual puede ser correlacionado con el modelo geológico de Terzaghi, que implica que la compresión primaria tiende a ser finita.
- b) La compresión secundaria se analiza con un modelo propuesto por el autor denominado Unidad -Z, el cual representa el comportamiento viscoso intergranular del suelo ⁽¹⁾.

MODELO DE KELVIN

El modelo de Kelvin queda representado por dos elementos en paralelo (fig. 4). Un elemento es resultante y capaz de tomar carga permanente al final del proceso primario, y el otro, representa un amortiguamiento Newtoniano de fluidez lineal ϕ_1 . Por consiguiente, se pueden establecer las siguientes condiciones:

De Equilibrio:

$$\Delta p = \Delta \sigma_1 + \sigma_{N1} \quad (3)$$

De deformación volumétrica unitaria:

$$\Delta \varepsilon_{v1} = \Delta \varepsilon_1 = \Delta \varepsilon_{N1} \quad (4)$$

De esfuerzo-deformación volumétrica unitaria:

$$\Delta \varepsilon_1 = \alpha_1 \Delta \sigma_1 \quad (5)$$

$$\Delta \dot{\varepsilon}_N = \phi_1 \Delta \sigma_{N1} \quad (6)$$

Resolviendo para el valor de $\Delta \dot{\varepsilon}_{v1}$, se encuentra la siguiente ecuación diferencial del fenómeno primario.

$$\Delta \dot{\varepsilon}_{v1} + \frac{\phi_1}{\alpha_1} \Delta \varepsilon_{v1} = \phi_1 \Delta p \quad (7)$$

Integrando se obtiene

$$\Delta \varepsilon_{v1} = \alpha_1 \Delta p \left(1 - e^{-\phi_1 t / \alpha_1} \right) \quad (8)$$

Para un número grande de unidades se puede escribir

$$\Delta \varepsilon_{v1} = \Delta p \left(\sum \alpha_1 - \sum \alpha_1 e^{-\phi_1 t / \alpha_1} \right) \quad (9)$$

Considerando que $\sum \alpha_1 = \alpha$ representa la compresibilidad, se obtiene finalmente

$$\Delta \varepsilon_{v1} = \alpha \Delta p \left(1 - \sum \frac{\alpha_1}{\alpha} e^{-\phi_1 t / \alpha_1} \right) \quad (10)$$

Por otro lado, de la teoría de consolidación de Terzaghi se obtiene

$$\Delta \varepsilon_{v1} = m_v \cdot \Delta p \left(1 - \sum \frac{2}{M} e^{-M \cdot \tau_v} \right) \quad (11)$$

En donde $T_v = c_v \cdot T / H^2$ es el factor tiempo primario, y $M = (2m - 1)^2 \pi^2 / 4$

Si comparamos las ecuaciones 10 y 11 vemos que el modelo de Kelvin y el de Terzaghi son equivalentes. Su correspondencia queda establecida por medio de las siguientes relaciones.

$$\frac{\alpha_1}{\alpha} = \frac{2}{M}, \text{ y, } \frac{\phi_1}{\alpha_1} = M c_v / H^2$$

De donde se obtiene

$$\alpha = m_v, \text{ y, } \frac{\phi_1}{\alpha} = \frac{2c_v}{H^2} \quad (12)$$

Del análisis anterior queda establecido para la compresión el uso de la función de Terzaghi; $F(T_v)$, luego podemos escribir

$$\Delta \varepsilon_{v1} = m_v \cdot \Delta p F(T_v) \quad (13)$$

UNIDAD -Z

La unidad -Z queda constituida por dos elementos en paralelo a semejanza del modelo de Kelvin, esto es, un Newtoniano de fluidez no lineal que representa la fluidez intergranular que disminuye con el tiempo, y el otro que representa un amortiguador Newtoniano de fluidez lineal, ϕ_2 , el cual retarda la deformación volumétrica unitaria de la estructura secundaria (fig 4b). Se establecen para esta unidad las siguientes condiciones.

De equilibrio

$$\Delta p = \Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_{N2} \quad (14)$$

De deformación volumétrica unitaria

$$\Delta \varepsilon_{v2} = \Delta \varepsilon_2 = \Delta \varepsilon_{N2} \quad (15)$$

De esfuerzo-deformación volumétrica unitaria

$$\Delta \dot{\varepsilon} = \frac{a}{b + t} \Delta \sigma_2 \quad (16)$$

$$\Delta \dot{\varepsilon}_{N2} = \phi_2 \Delta \sigma_{N2} \quad (17)$$

Resolviendo para $\Delta \dot{\varepsilon}_{v2}$, se obtiene la siguiente ecuación diferencial para la unidad -Z

$$\Delta \dot{\varepsilon}_{v2} = \frac{a}{b + a / \phi_2 + t} \cdot \Delta p \quad (18)$$

Integrando y considerando que para $t = 0$, $\Delta p = \Delta \sigma_{N2}$ de la ecuación 17 y 18 se obtiene $b = 0$, por consiguiente

$$\Delta \varepsilon_{v2} = 2.31a \Delta p \log \left(1 + \frac{\phi_2}{a} \cdot t \right) \quad (19)$$

La ecuación 19 se puede escribir en forma conveniente como sigue

$$\Delta \varepsilon_{v2} = 2.31a \Delta p \log \left(1 + \frac{\phi_2}{a} \cdot \frac{\alpha}{\phi_1} \cdot \frac{\phi_1}{\alpha} t \right)$$

Llamemos $2.31 a = m_t$ un valor medio para el incremento sostenido de Δp . De las relaciones Kelvin-Terzaghi se obtiene

$$\frac{\alpha}{a} = 2.31 m_v / m_t; \quad Y; \quad \frac{\phi_1}{\alpha} = 2 c_v / H^2$$

Definiendo $m_t / m_v = \beta$ se encuentra para la compresión volumétrica unitaria del fenómeno de viscosidad intergranular

$$\Delta \varepsilon_{v2} = m_t \log \left(1 + \frac{4.62}{\beta} \frac{\phi_2}{\phi_1} T_v \right) \Delta p \quad (20)$$

en donde

$$\frac{4.62}{\beta} \frac{\phi_2}{\phi_1} = \xi \quad (21)$$

El valor de ξ es un parámetro adimensional que se determina de las pruebas. Nótese que $c_v \xi / H^2 = 1 / \tau$ es el inverso de un tiempo, que representa el tiempo de relajamiento de la compresión secundaria, así pues

$$\xi = \frac{H^2}{\tau c_v} \quad (22)$$

La ecuación 20 también se puede escribir

$$\Delta \varepsilon_{v2} = m_t \log(1 + t / \tau) \Delta p \quad (23)$$

Nótese que los valores de τ para la misma deformación volumétrica unitaria se encuentran en la siguiente proporción.

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{H_1^2}{H_2^2} \quad (24)$$

De la ecuación 2 se puede escribir en forma adimensional para la deformación total volumétrica unitaria

$$\frac{\Delta \varepsilon_v}{m_v \Delta p} = F(T_v) + \beta \log(1 + \xi T_v) \quad (25)$$

Por tanto

$$\Delta \varepsilon_v = m_v \cdot \Delta p \cdot \Omega$$

En donde Ω representa la configuración de las curvas de consolidación incluyendo el fenómeno de viscosidad intergranular. En la fig. 5, se ha dibujado una familia de curvas para un valor fijo de β haciendo variar el valor de ξ . De estas configuraciones se puede juzgar la importancia de la compresión secundaria. Nótese que para $\beta = 0$, esto es, $m_i = 0$, no existe la compresión secundaria, y por tanto, la curva límite sería la correspondiente a $F(T_v)$. A medida que ξ crece para cualquier valor fijo de β , la curva límite de viscosidad intergranular tiende a ser una línea recta en escala semi-log, e inmediatamente después del quiebre de dicha curva (fig.5). Lo anterior ocurre cuando $\phi_2 = \phi_1$ de donde resulta un valor teórico límite de $\xi = 5.0$.

Los parámetros m_v , C_v , β y ξ son funciones del nivel de esfuerzo sobre el cual se aplica un incremento Δp de carga unitaria que produce el fenómeno de consolidación y pueden ser determinados de la prueba del odómetro. Los parámetros que se citan tienen el siguiente significado.

- m_v ; Coeficiente de compresibilidad volumétrica unitario para la compresión primaria
- C_v ; Coeficiente de consolidación del fenómeno primario
- β ; Factor que mide la magnitud relativa del fenómeno viscoso intergranular
- ξ ; Factor adimensional que modifica el valor de $T_v = c_v t / H^2$ en el fenómeno viscoso intergranular, ecuación 25.

METODO DE AJUSTE PARA DETERMINAR PARAMETROS

Para la determinación y análisis de los parámetros que intervienen en la ecuación 25, se utiliza dicha ecuación en la siguiente forma

$$\delta = \delta_v F(T_v) + C_t \log(1 + t / \tau) \quad (26)$$

Se de las configuraciones de la fig. 5, que para un valor de $T_v = 2.0$, se obtiene $F(T_v) = 1$, que corresponde aproximadamente al lugar donde la curva sufre una inflexión en su curvatura. Este punto se designa por B con coordenadas δ_B, t_B . Además, se escoge otro punto, F, lo más alejado posible del quiebre de la curva de consolidación, esto es, al final de la zona recta en escala semi-log de la compresión secundaria, con coordenadas δ_F, t_F . Para estos dos puntos se obtiene, según la ecuación 26.

$$\delta_B - \delta_F = 0.43 C_t \ln \frac{1 + t_B / \tau}{1 + t_F / \tau} \quad (27)$$

Resolviendo la ecuación 27 para el valor de τ se obtiene

$$\tau = \frac{e^a t_F - t_B}{1 - e^a} \quad (28)$$

En donde $a = 2.31 (\delta_B - \delta_F) / C_t$.

El valor de C_t se determina de la pendiente de la curva en la zona recta de la ley logarítmica para dos puntos sobre ésta

$$C_t = \frac{\delta_2 - \delta_1}{\log t_2 / t_1} \quad (29)$$

Conociendo el valor de τ , se calcula δ_v por medio de

$$\delta_v = \delta_B - C_t \log(1 + t_B / \tau) \quad (30)$$

Como primera aproximación para el valor de C_v , se utiliza $\delta_v / 2$ encontrando en la curva un valor para t_{50} , que corresponde al 50% de compresión primaria, esto es, para $T_v = 0.2$ y $F(T_v) = 0.5$, de donde

$$C_v = 0.2H^2 / t_{50} \quad (31)$$

Enseguida se calcula $\xi = H^2 / \tau C_v$ y se entra en la siguiente ecuación para el 50% de consolidación

$$\delta_{50} = \delta_v / 2 + C_t \log(1 + 0.2\xi) \quad (32)$$

Con un nuevo valor de δ_{50} , calculando de la ecuación 32, se encuentran nuevos valores de t_{50} , C_v y ξ respectivamente. Se repite el cálculo, y usando la ecuación 32 nuevamente, se encuentra un valor mejorado de δ_{50} . Se prosigue con la iteración hasta que los valores de C_v y ξ ya no cambien substancialmente.

Los parámetros que intervienen en la ecuación 25 podrán ser calculados por medio de las expresiones que se proporcionan a continuación para un determinado nivel de esfuerzo medio $p + \frac{1}{2} \Delta p$ correspondiente a cada una de las curvas de consolidación obtenidas en el odómetro, respectivamente.

$$m_v = \frac{\delta_v}{2H\Delta p}; m_t = \frac{C_t}{2H \cdot \Delta p}; \beta = \frac{m_t}{m_v} \quad (33)$$

Los valores de C_v y ξ serán obtenidos anteriormente durante el método de ajuste.

Con el objeto de ilustrar el procedimiento de ajuste, se utiliza una curva de consolidación obtenida en el odómetro en una arcilla limosa inalterada con un contenido de agua de 288%, (Fig. 6). El incremento de esfuerzo unitario usado $\Delta p = 0.6 \text{ k / cm}^2$ fue aplicado a un nivel de esfuerzo de 1.2 k / cm^2 con un espesor de la probeta de $2H = 1.72 \text{ cm}$. El esfuerzo crítico $\sigma_b = 3.7 \text{ k / cm}^2$ se muestra en la curva de compresibilidad para el suelo ensayado (Fig. 1).

El punto B elegido cuando la curva cambia de curvatura y el punto F, (Fig. 6), tienen los siguientes valores en micras, μ y segundos, t , a saber

$$\text{Punto B} \quad \delta_B = 135 \mu, \quad t_B = 800 \text{ seg}$$

$$\text{Punto F} \quad \delta_F = 248 \mu, \quad t_F = 100,000 \text{ seg}$$

El valor de C_t se determina en la zona recta de la curva y se obtiene un valor de 60μ . Con la ecuación 28 se obtiene

$$a = 2.31 (135 - 248) / 60 = -4.3505$$

De donde el valor de $\tau = 496.4$ seg. Aplicando la ecuación 30, se calcula:

$$\delta_v = 135 - 60 \log (1 + 800 / 496.4) = 110.0 \mu$$

Entrando a la curva de laboratorio, (Fig. 6), con $\frac{1}{2} \delta_v = 55.0$, se obtiene $t_{50} = 58$ seg, donde los valores:

$$C_v = 0.2 (0.86)^2 / 58 = 2.550 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 / \text{seg}$$

$$\xi = (0.86)^2 / C_v \cdot \tau = 0.584$$

Para mejorar los valores de C_v y ξ , se utiliza la ecuación 32

$$\delta_{50} = 55.0 + 60 \log (1 + 0.584 \cdot 0.2)$$

$$\delta_{50} = 57.87 \mu$$

Entrando nuevamente en la curva de la Fig. 6, con 57.9μ se determina $t_{50} = 60$ seg. y se calcula nuevamente C_v y ξ muestran suficiente precisión se suspende la iteración, por lo que la curva teórica queda de la siguiente manera:

$$\delta = 110.0 F(T_v) + 60 \log (1 + 0.604 T_v) \quad (34)$$

En donde $T_v = (3.333 \times 10^{-3})t$

Para confrontar el ajuste de la curva teórica con la de laboratorio, se calcularon los valores de δ con la ecuación 34 y se registraron en la Fig. 6. Se puede reconocer que la concordancia entre la curva teórica y la obtenida en el odómetro se muestra muy satisfactoria. Sin embargo, en la primera fase de la compresión primaria el ajuste no es tan perfecto ; lo anterior se puede atribuir principalmente a la descompresión del agua de poro que libera gas en forma de burbujas microscópicas que afectan la permeabilidad del suelo⁽²⁾. Para evitar esto en la prueba, sería necesario efectuar las pruebas del odómetro bajo una presión hidrostática equivalente a la de campo para la cual se obtuvo la muestra. Esta práctica podrá dar mejores resultados en la determinación de los parámetros antes descritos.

Para el comportamiento de la curva que muestra la Fig. 6, los parámetros son

- 1) Nivel medio de esfuerzos 1.5 k / cm²
- 2) Incremento 0.6 k / cm²
- 3) $m_v = 0.0107 \text{ cm}^2 / \text{k}$
- 4) $C_v = 2.465 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 / \text{seg}$
- 5) $m_t = 0.00581 \text{ cm}^2 / \text{k}$
- 6) $\beta = 0.543$
- 7) $\xi = 0.604$

Usando los parámetros antes encontrados, la curva teórica se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta\varepsilon = 0.00642 \{F(T_v) + 0.543 \log(1 + 0.604T_v)\}$$

Para el nivel de esfuerzos e incrementos antes citados, $T_v = (3.333 \times 10^{-3}) t$

Otro de los problemas que se suscitan en la prueba del odómetro es la fricción del suelo contra el anillo, la cual aumenta a medida que el suelo se consolida. Lo anterior se puede reducir considerablemente si usan anillos flotantes y un producto repelente al suelo que haga disminuir la fricción. Algunos repelentes, como la gelatina de silicón, pueden reducir la fricción sobre el anillo en forma considerable.

Por otro lado, la membrana de suelo remoldeado que se forma al afinar la pastilla de suelo en el anillo del odómetro, tiende a retrasar el proceso de consolidación en su primera fase, ya que dicha membrana tiene una permeabilidad considerablemente más baja que el suelo inalterado del espécimen. La importancia de lo anterior debe ser investigado para poder efectuar una corrección en el valor del coeficiente de consolidación. Así también, dicha membrana de suelo remoldeado afecta la compresibilidad, haciéndose necesario efectuar la corrección correspondiente.

Finalmente, se puede decir que a pesar de los problemas que presenta el odómetro, los parámetros que se encuentran con su uso tienen precisión suficiente desde un punto de vista práctico, si las probetas son confiables, la prueba se realiza cuidadosamente y se efectúan las correcciones antes mencionadas⁽³⁾.

REFERENCIAS

- (1) "Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions" (1982) by Leonardo Zeevaert, second edition. Van Nostrand Reinhold Co. Chapter II, P. 85 - 114

- (2) "Descompresión en Depósitos de Suelos Impermeables" (1982) por Leonardo Zeervaert. Facultad de Ingeniería, UNAM, División de Estudios de Posgrado.

- (3) "An Investigation of the Factors Affecting Laboratory Consolidation of Clays" (1948) by T. W. Van Zelst, Proc. Second International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam Vol. VII, p. 52

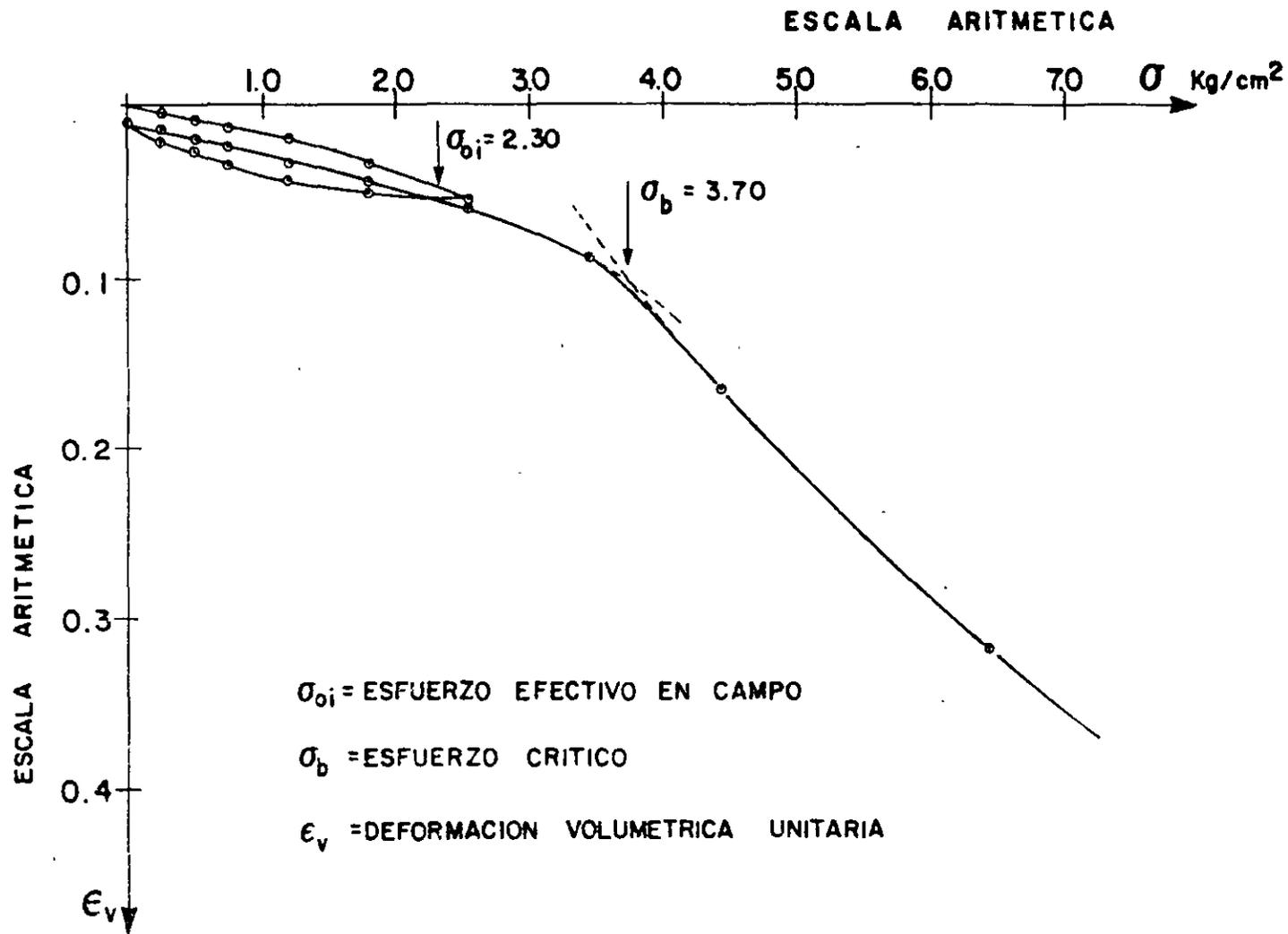


FIG- 1 CURVA DE COMPRESIBILIDAD

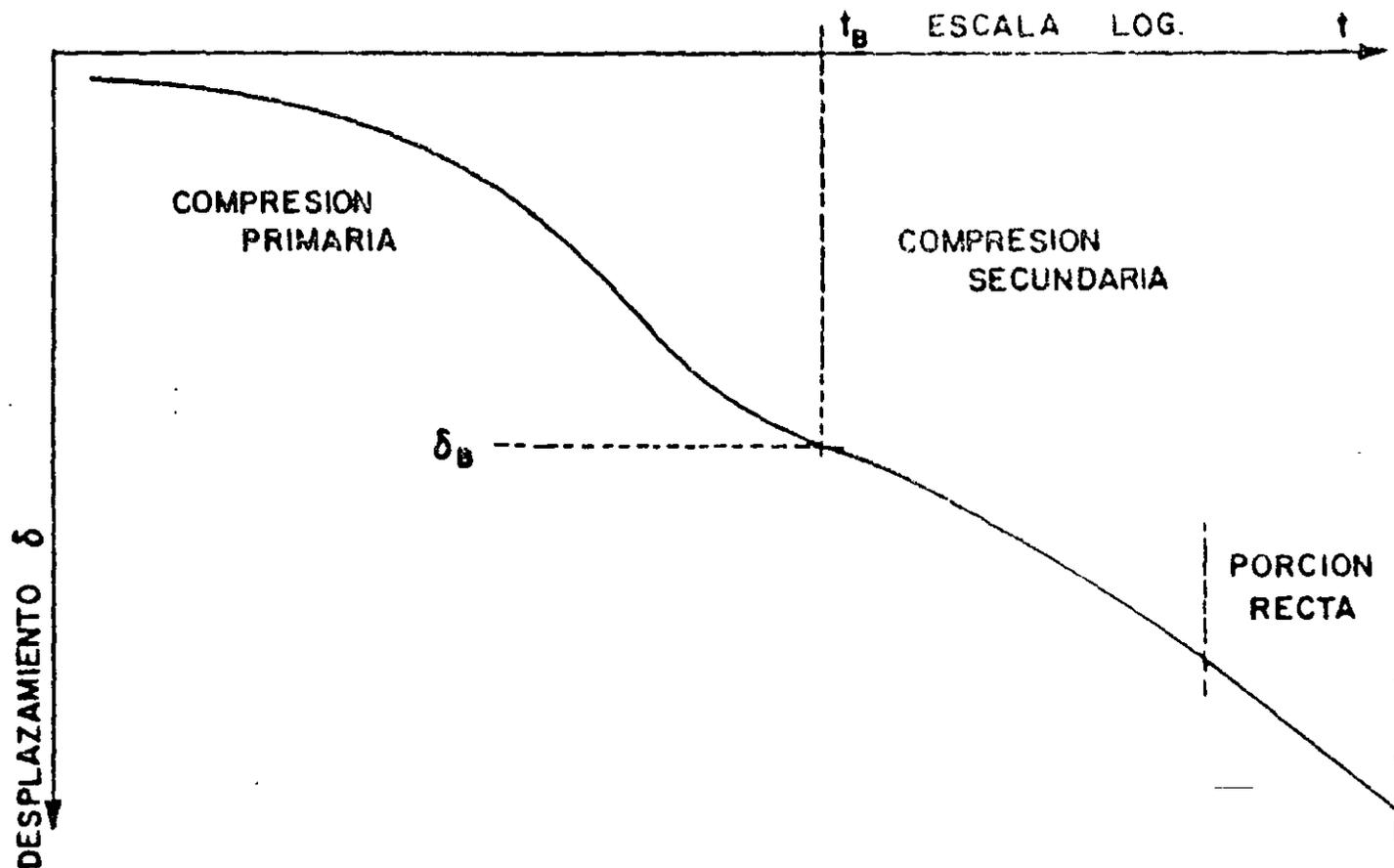


FIG- 2 CURVA DE CONSOLIDACION ANTES DEL ESFUERZO CRITICO

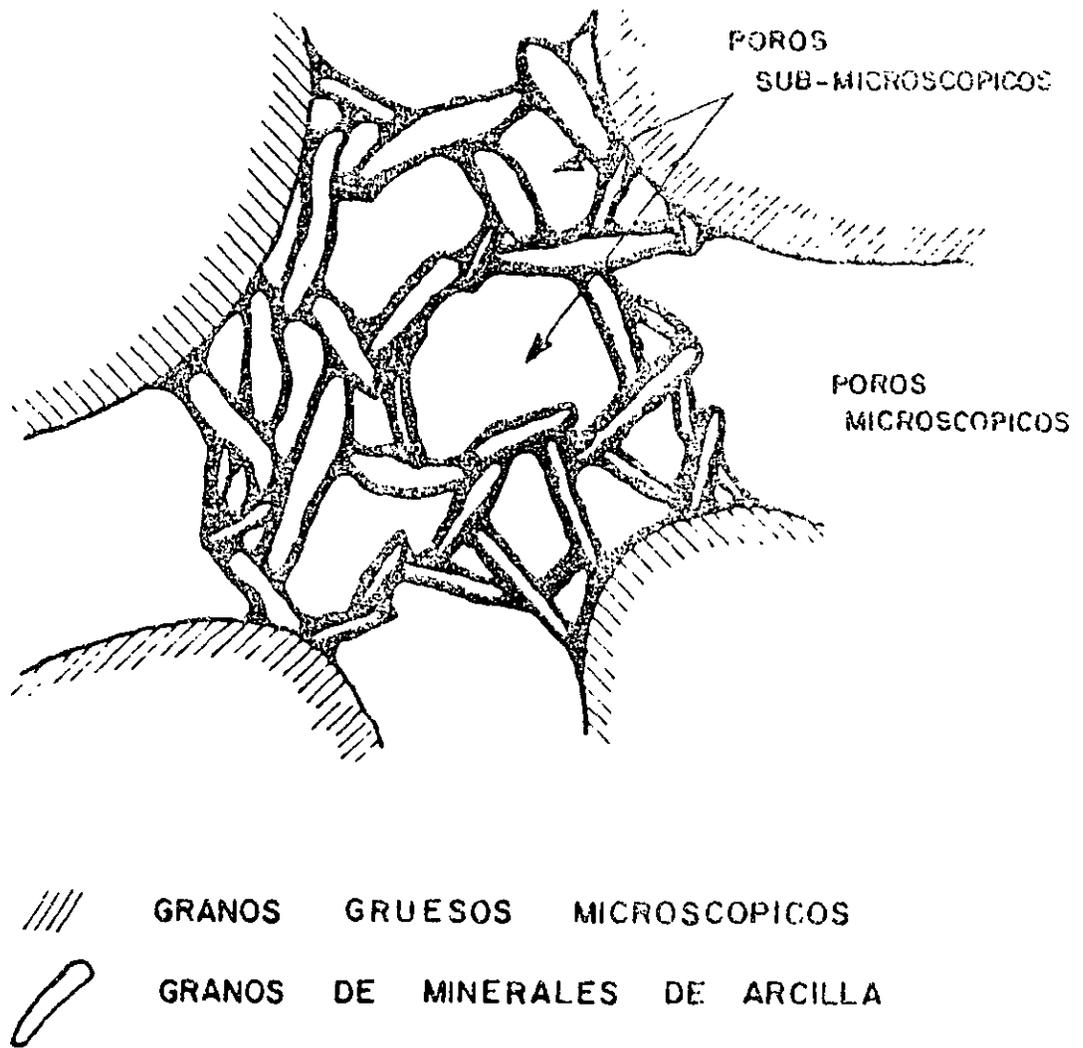


FIG-3 CONCEPCION ARTISTICA DE AGLOMERACION DE GRANOS SUBMICROSCOPICOS

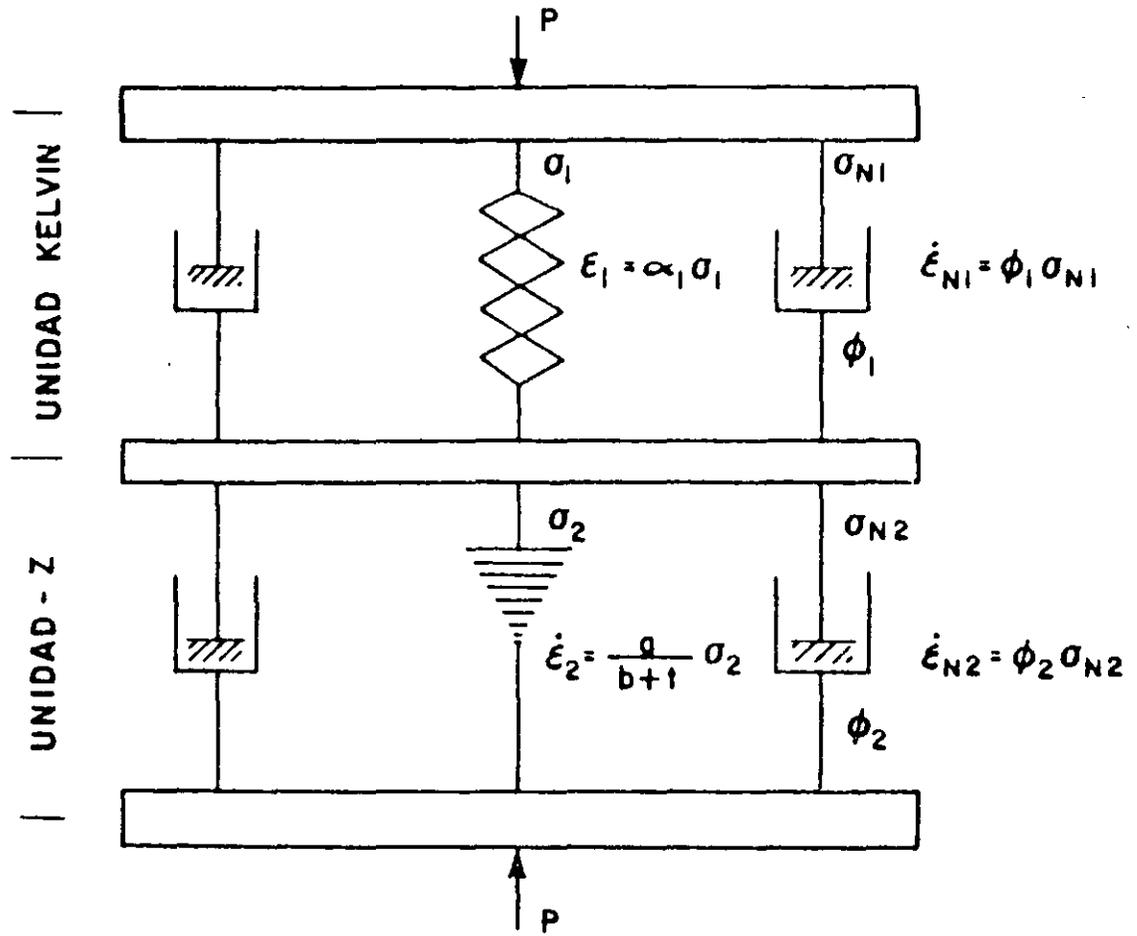
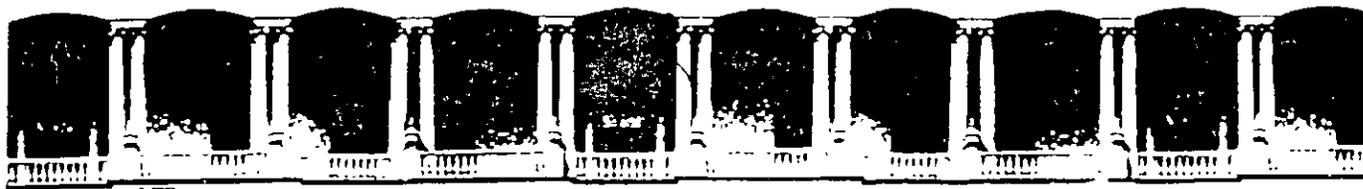


FIG- 4 MODELO REOLOGICO



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS I

TEMA

**ELEMENTOS TEÓRICOS DE ESTADOS DE ESFUERZO
Y DEFORMACIÓN**

**CONFERENCISTA
ING. RICARDO PADILLA VELÁZQUEZ
PALACIO DE MINERÍA
MAYO 2000**

7.1 ELEMENTOS TEÓRICOS DE ESTADOS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN

7.1.1 ESTADO DE ESFUERZO

El estado de esfuerzo en un punto de un medio continuo, se puede representar, por medio de un cubo diferencial (en el caso de análisis tridimensional), o por medio de un cuadrado diferencial (en el caso de análisis plano). En este tipo de representaciones, se ha descompuesto al vector esfuerzo (en sus componentes normal y cortante(s)), que actúa en dirección de cada uno de los ejes del sistema de referencia.

Al vector esfuerzo se le define como :

$$\vec{S} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\vec{\Delta F}}{\Delta \Delta A} = \frac{d\vec{F}}{dA}$$

Otra forma de definirlo, pero ahora orientado, respecto a un sistema de referencia cartesiano, y actuando en un plano normal a un eje del sistema de referencia, es :

para el plano en dirección X:

→

$$S_x = \sigma_x i + \tau_{xy} j + \tau_{xz} k$$

para el plano en dirección Y:

→

$$S_y = \tau_{yx} i + \sigma_y j + \tau_{yz} k$$

para el plano en dirección Z:

→

$$S_z = \tau_{zx} i + \tau_{zy} j + \sigma_z k$$

Observe que las componentes de los vectores son los esfuerzos orientados, para cada una de las caras del cubo diferencial mostrado en la figura 7.1.2.

La convención de signos de los esfuerzos representados en un cubo diferencial o un cuadrado diferencial, que representen a los esfuerzos actuantes en un punto, es diferente para la ingeniería estructural, que para Mecánica de Suelos. La convención que se usará en este curso, será la de Mecánica de Suelos.

CONVENCIÓN DE SIGNOS DE ESFUERZOS.

Antes de definir la convención de signos de los esfuerzos, se debe definir a que se le llama cara positiva.

DEFINICIÓN: Se define como caras positivas, a aquellas por donde saldrían los ejes del sistema de referencia, si se sitúa el origen de éste en el centro del elemento diferencial. Observe la figura 7.1.1.

Se conviene considerar como esfuerzos con signo positivo , a aquellos que actuando en cara positiva, se representen en el elemento diferencial, con sentido opuesto al sentido de su eje paralelo del sistemas de referencia. Vea la figura 7.1.2 .

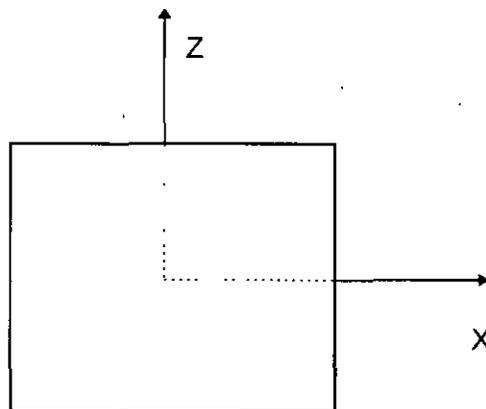
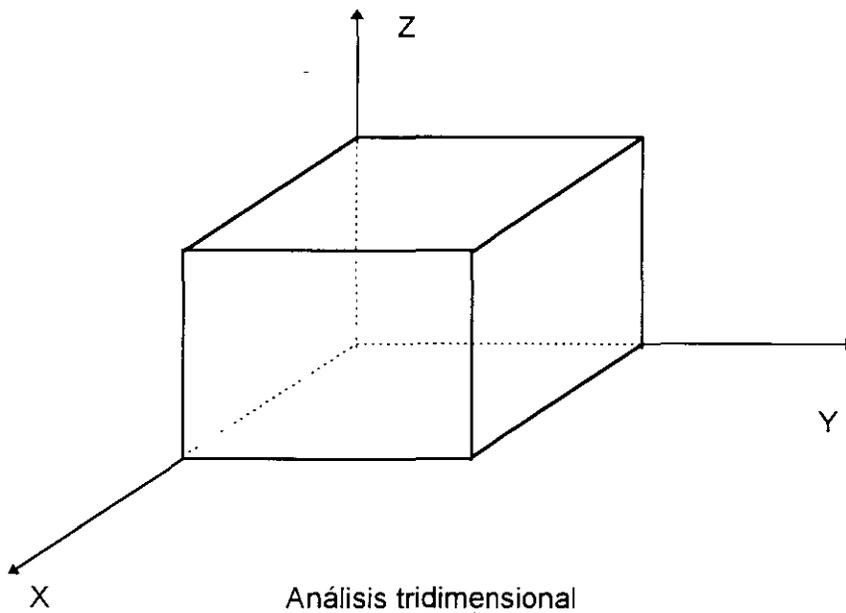


Fig. 7.1.1 Caras Positivas

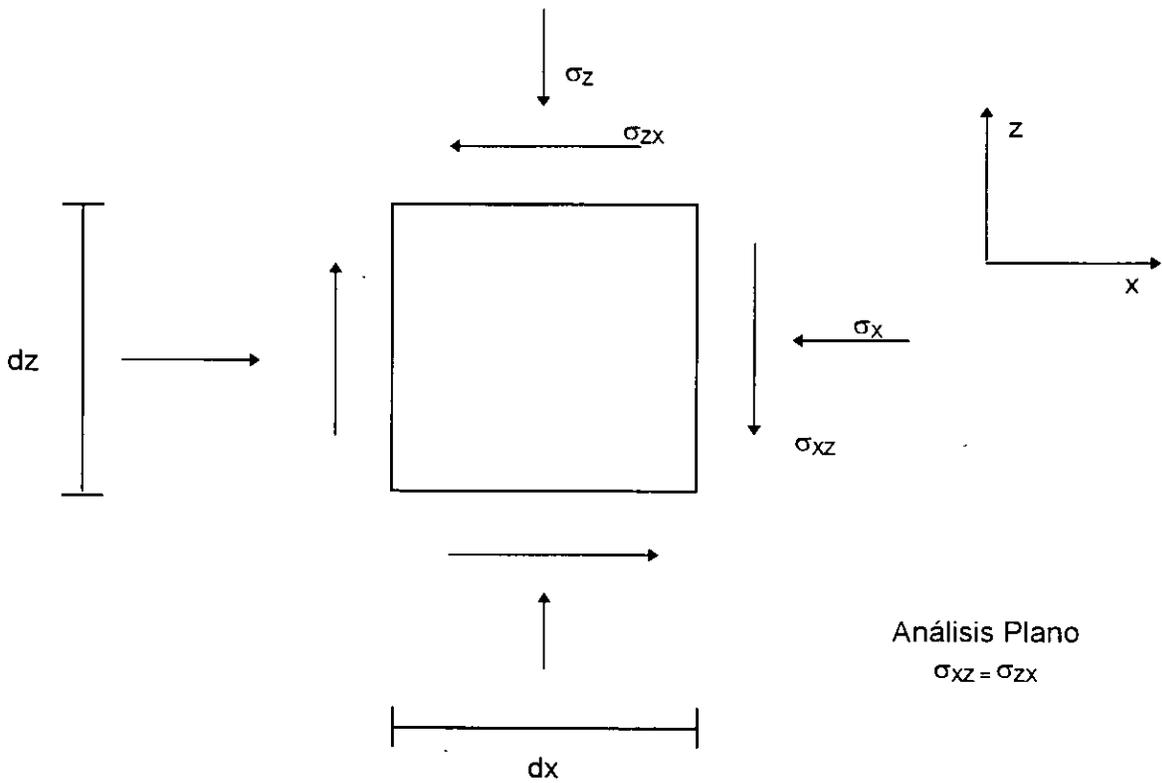
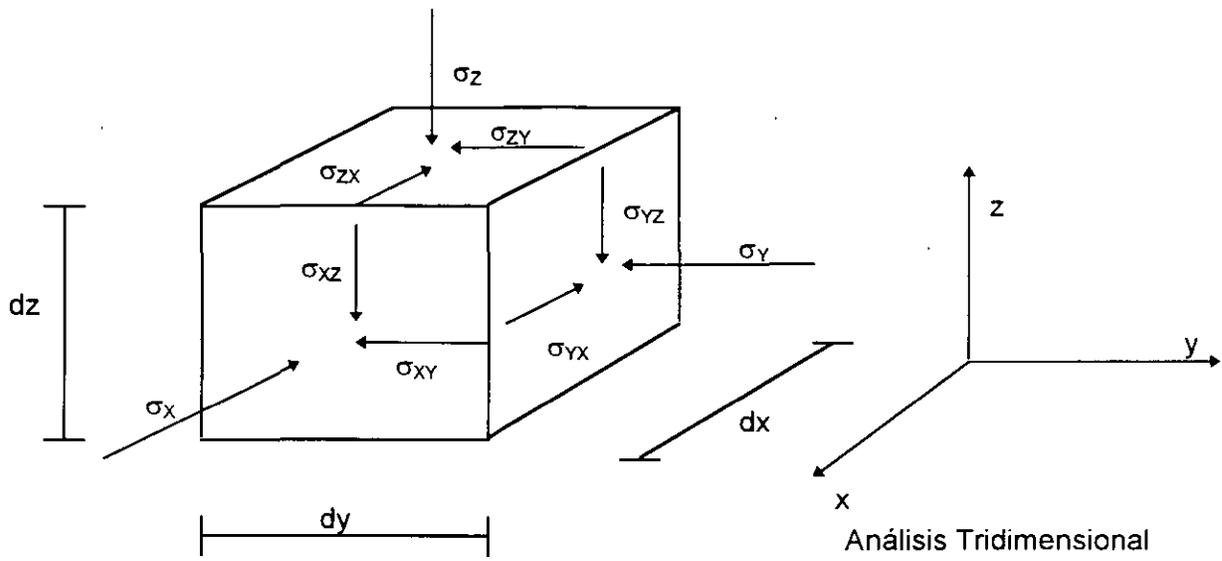


Fig. 7.1.2 Esfuerzos positivos en Mecánica de Suelos

TENSOR ESFUERZO.

En una forma no estricta, definiremos como tensor, a una matriz que tiene ciertas propiedades (que por falta de tiempo no las veremos), en la cual se acomodan en forma de columna, a los vectores esfuerzo, referidos a un sistema de referencia. Al tensor esfuerzo se le define por una T.

En análisis tridimensional: $T = \begin{bmatrix} \bar{s}_x & \bar{s}_y & \bar{s}_z \end{bmatrix}$

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

En análisis plano de esfuerzos : $T = \begin{bmatrix} \bar{s}_x & \bar{s}_z \end{bmatrix}$

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{zx} \\ \tau_{xz} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

Los esfuerzos mostrados en los elementos diferenciales de la figura 7.1.2, forman tensores, donde todos los elementos tienen signo positivo. Los tensores tienen utilidad para analizar esfuerzos, por medio de métodos gráficos o analíticos.

En este curso sólo usaremos el análisis plano de esfuerzos, ya que las pruebas de laboratorio que veremos, se pueden estudiar desde este punto de vista. En la figura 7.1.3, se muestra la representación gráfica de Mohr, donde se cumple que todos los esfuerzos sean de compresión (en Mecánica de Suelos se acepta que los suelos no resisten tensión), y con diferente valor. Esta condición cumple con:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$$

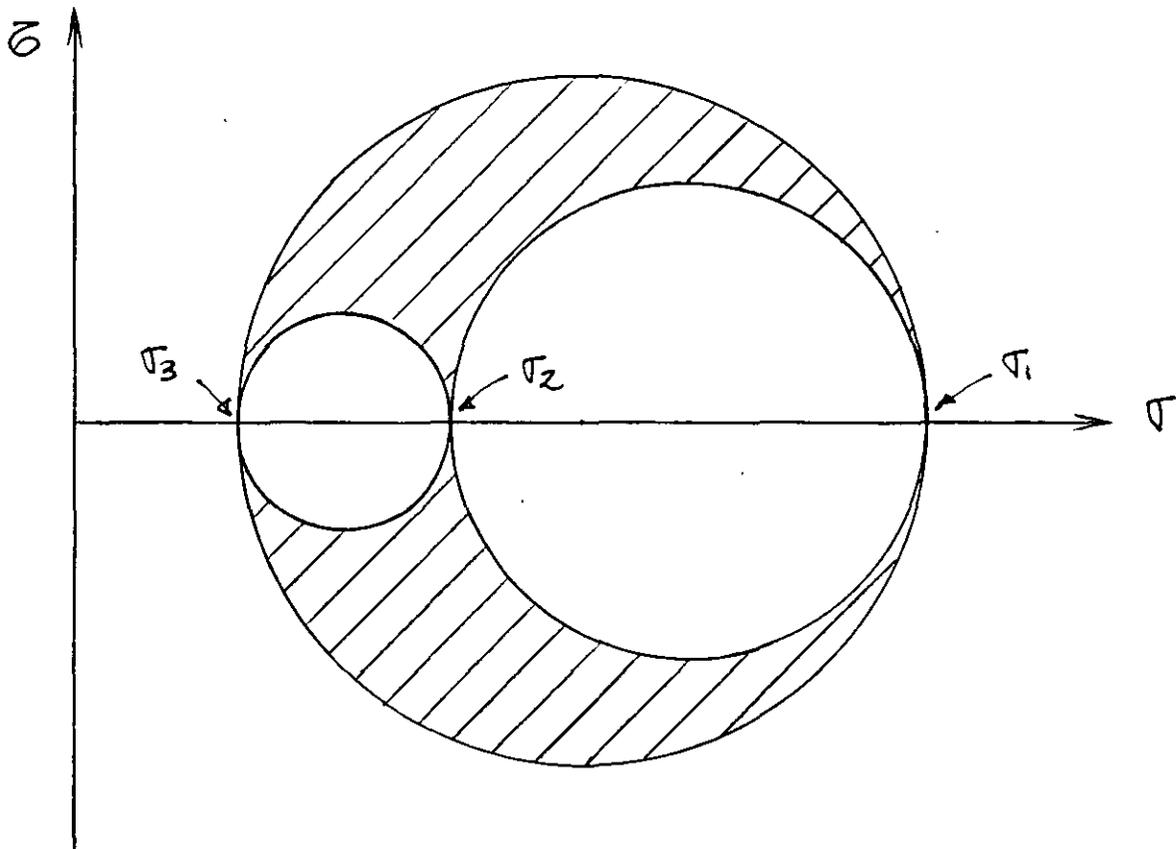
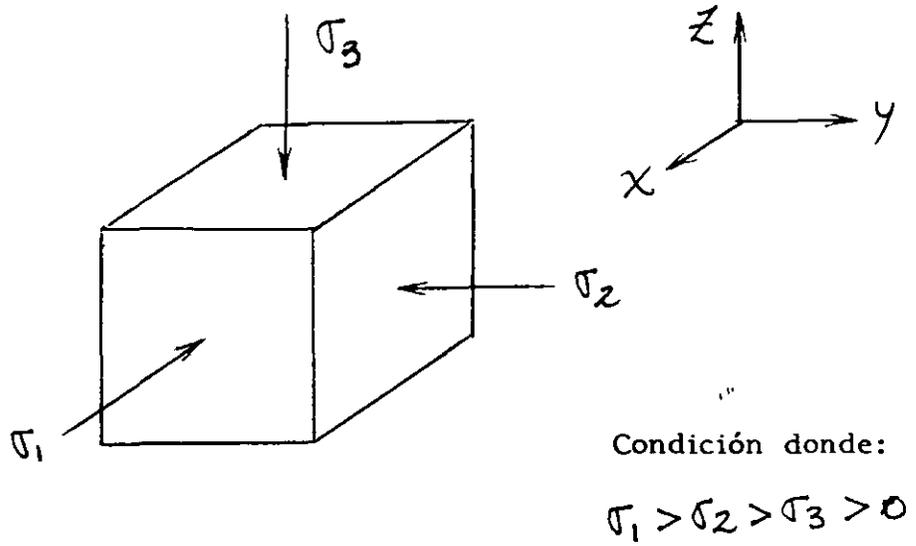


Fig. 7.1.3 Representación tridimensional de Mohr, para la condición mostrada

REPRESENTACIÓN DE MOHR EN ANÁLISIS PLANO DE ESFUERZOS.

La representación de Mohr, para el análisis plano de esfuerzos, se puede hacer con un solo círculo de Mohr, y puede representar al estado de esfuerzos tridimensional perfecto, si cumple que:

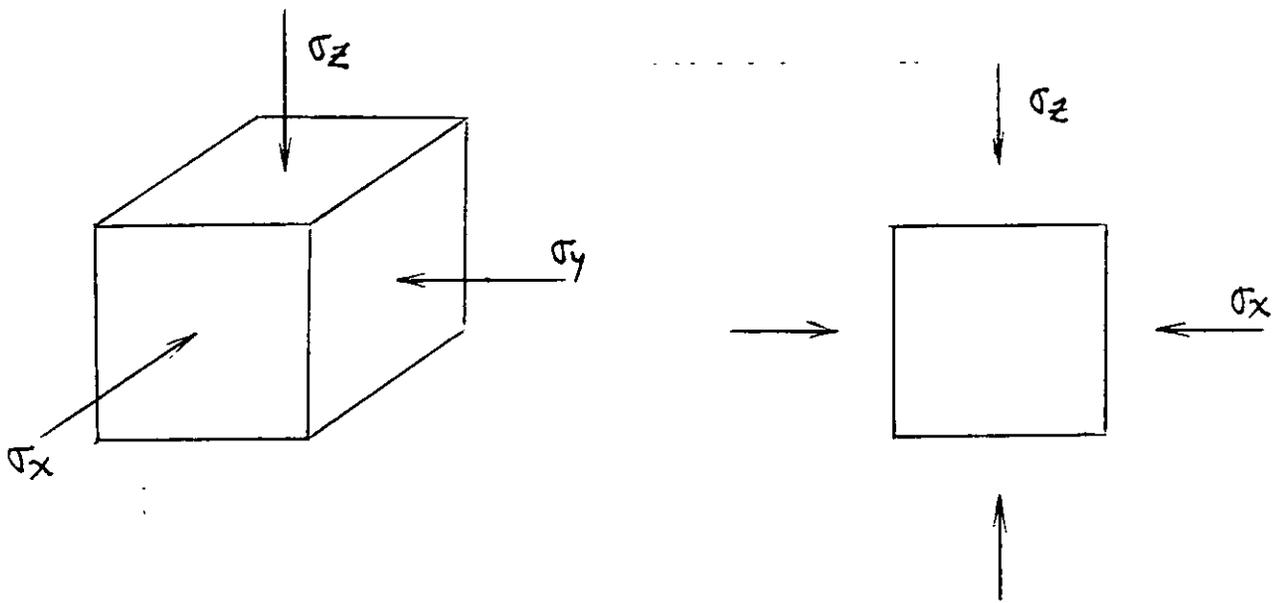
$$\begin{array}{l} \sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 \\ \text{O} \quad \sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3 \end{array}$$

En la gráfica de la figura 7.1.4, se cumple que:

$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$$

En cualquier otro caso de análisis de esfuerzo plano, que no cumpla el estado tridimensional perfecto, se pueden cometer graves errores.

En este curso veremos un método gráfico, ideado por el Dr. Dagoberto de la Serna, que es muy versátil y didáctico. Este método fue bautizado por su autor como el método del " polo fijo", y lo veremos a continuación.



Condición donde:

$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$$

$$\sigma_2 > \sigma_x = \sigma_y$$

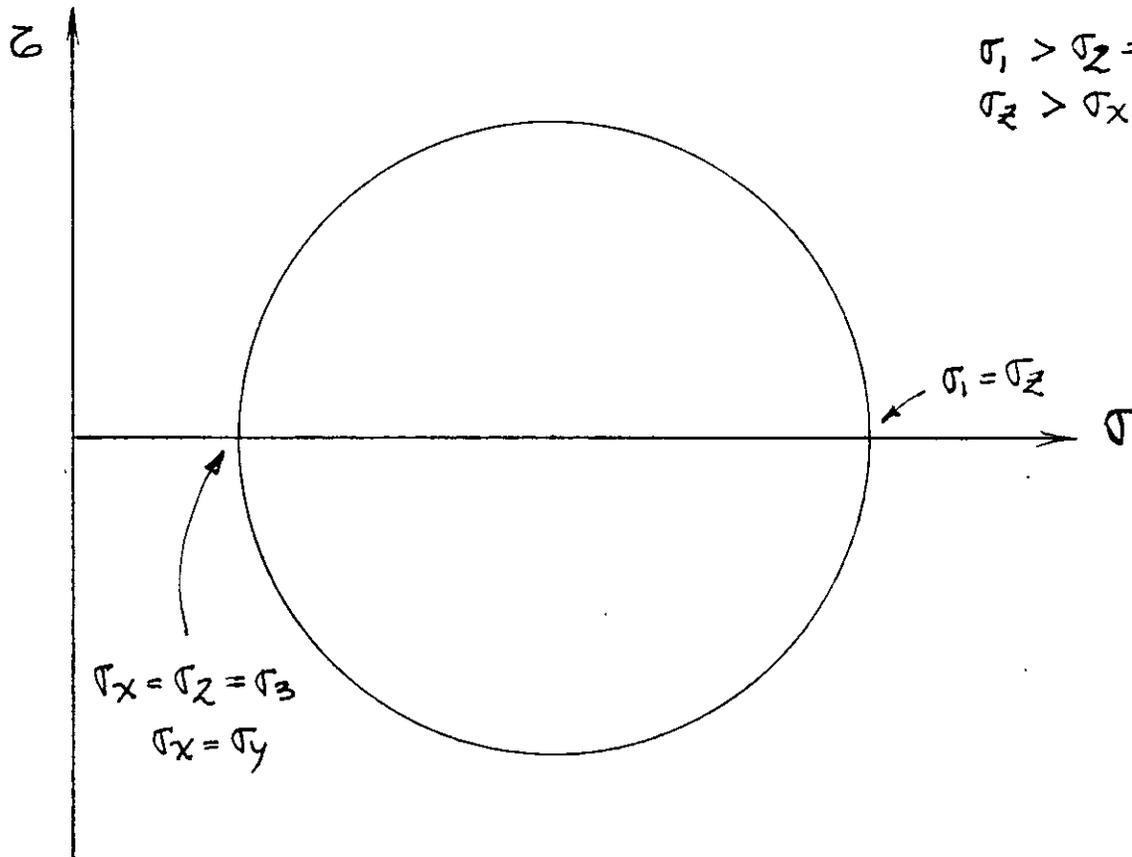


Fig. 7.1.4 Representación tridimensional de Mohr en Análisis plano

MÉTODO GRÁFICO DE MOHR, DEL POLO FIJO.

Antes de exponer el método, debemos definir el concepto de "versor".

DEFINICIÓN : se define como versor, a un vector unitario normal al plano de interés, (plano δ), de modo que sus componentes definen a ese plano.

Los versores al ser unitarios, quedan definidos por sus cosenos directores. Estos se pueden definir como:

En análisis tridimensional:

$$\mathbf{n} = n_x \mathbf{i} + n_y \mathbf{j} + n_z \mathbf{k}$$

$$\text{donde } n_x = \cos \alpha$$

$$n_y = \cos \beta$$

$$n_z = \cos \gamma$$

donde α , β y γ son los ángulos directores del versor.

Aquí siempre se debe cumplir que: $n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = 1$

En análisis plano de esfuerzos:

$$\mathbf{n} = n_x \mathbf{i} + n_z \mathbf{k}$$

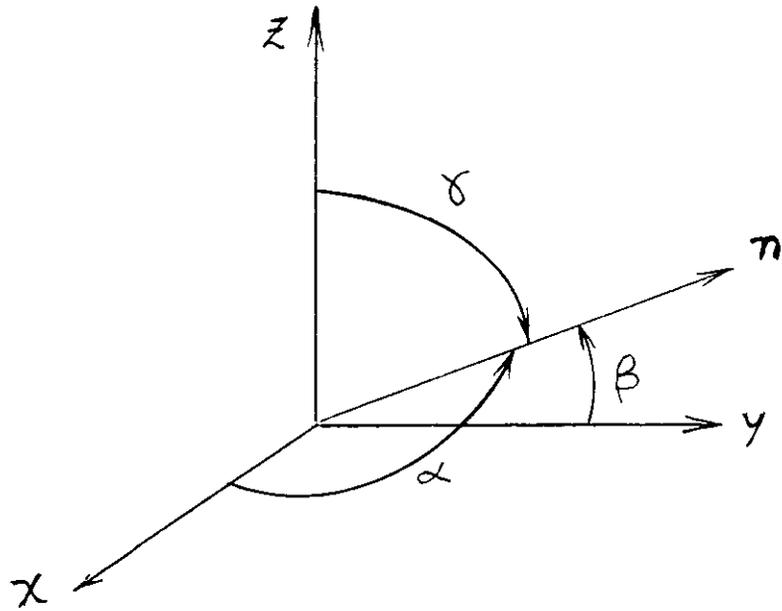
$$\text{donde : } n_x = \cos \alpha$$

$$\text{y } n_z = \cos \gamma$$

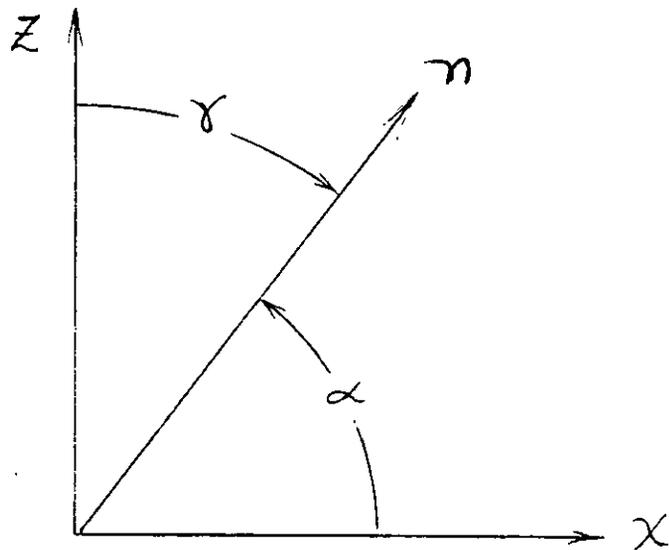
y donde α y γ son los ángulos directores del versor.

Aquí siempre se debe de cumplir que : $n_x^2 + n_z^2 = 1$

En la figura 7.1.5, se muestran los versores en el espacio y en el plano, con sus respectivos ángulos directores.



Versor en el espacio



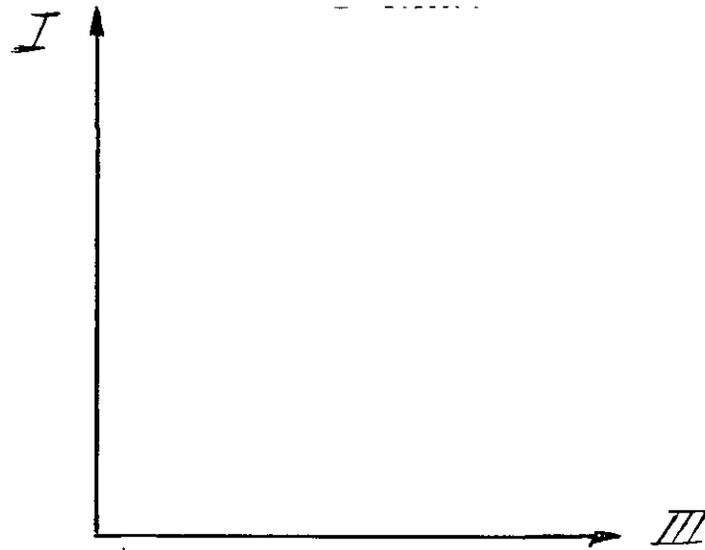
Versor en el plano

Fig. 7.1.5 Versores

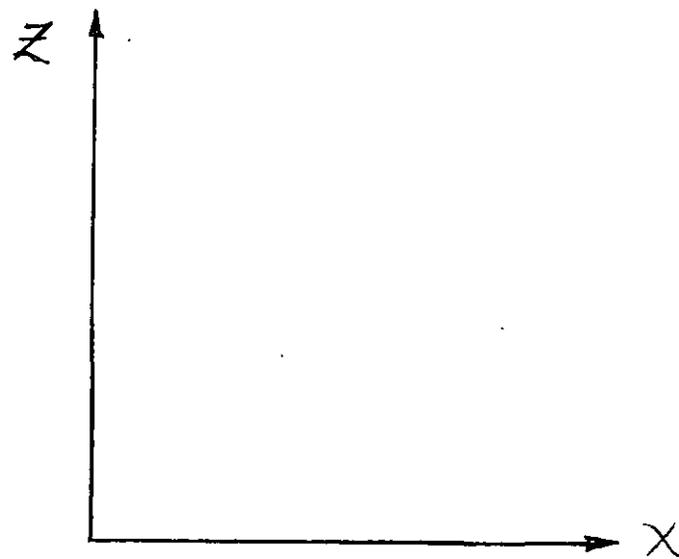
MÉTODO GRÁFICO DE MOHR (POLO FIJO) (MÉTODO PROPUESTO POR EL DR. DAGOBERTO DE LA SERNA)

Secuencia para obtener σ y τ en cualquier plano que se desee:

- 1.- Se elige una escala adecuada para los ejes del plano de Mohr.
- 2.- Se ubican los puntos correspondientes a los valores de σ_x y σ_z , sobre el eje de los esfuerzos normales.
- 3.- Se localiza el valor del esfuerzo cortante, en líneas perpendiculares al eje de los esfuerzos normales, y que toquen a los valores de σ_x y σ_z , de acuerdo a las siguientes reglas:
 - a) Asociado a σ_x , se ubica el valor del cortante, con signo contrario al que le corresponde en el tensor
 - b) Asociado a σ_z , se ubica el valor del cortante, con el mismo signo que tienen en el tensor.
- 4.- Definidos los puntos [$\sigma_x, -(\tau_{xz})$] y (σ_z, τ_{xz}), se unen por medio de una línea recta. Al punto donde esta línea corta al eje de los esfuerzos normales, se toma como centro del círculo, y como diámetro a la distancia entre los dos puntos antes definidos. Los valores principales, se pueden leer directamente donde el círculo corta al eje de los esfuerzos normales.
- 5.- En este método, el polo siempre se localiza en el punto que representa a σ_3 (esfuerzo principal menor). Este punto será en el plano de Mohr, el origen de todos los sistemas de referencia.
- 6.- Sobre el eje de los esfuerzos normales, siempre se alojará la dirección del esfuerzo principal mayor (σ_1), y con el mismo sentido. A este eje se le denominará con un uno romano (I)
- 7.- Perpendicular al eje de los esfuerzos normales y teniendo como origen el polo, se ubica la dirección de esfuerzo principal menor (σ_3), y con sentido contrario al eje de los esfuerzos cortantes, con el fin de formar un sistema de referencia derecho. A este eje se le denominará con un tres romano (III). Vea la figura 7.1.6.
- 8.- Se une con una línea recta al polo y al punto [$\sigma_x, -(\tau_{xz})$]. Esta línea nos marca la dirección del eje x, aunque todavía no definimos su sentido. Se une con otra línea recta al polo y al punto (σ_z, τ_{xz}). Esta línea nos indica la dirección del eje Z, aunque todavía no definimos su sentido. Para proponer los sentidos correctos del sistema de referencia XZ, se debe tener en cuenta que debe ser derecho, y como recomendación especial que se asignen de tal modo, que queden centrados los dos primeros cuadrantes, de los sistemas de referencia. Ver la figura 7.1.6.



Sistema de referencia principal



Sistema de referencia en uso

Fig. 7.1.6 Sistemas de referencia derechos (en análisis plano)

9.- Para obtener los valores correctos de σ y τ , en cualquier plano que se quiera, basta con orientar una línea que parta del polo y que represente a n , en la misma forma que se tiene respecto al sistema de referencia en uso XZ , y con la única condición de que apunte hacia el círculo (recordemos que todo plano por δ , tiene dos versores).

10.- El punto resultante de la intersección del versor y el círculo, nos indicara gráficamente los valores (módulo y signo) correctos de los esfuerzos σ y τ en el plano δ propuesto

Se hará un ejercicio en el curso, para practicar este método.

7.1.2 ELEMENTOS DE ESTADO DE DEFORMACIÓN

En esta parte se verá en forma muy simple la forma en que se miden las deformaciones en Mecánica de Suelos.

Se define como deformación a la diferencia de longitud que se tiene cuando se pasa de una longitud inicial a una longitud final (en este concepto no importan condiciones intermedias, ni el tiempo en que se da la deformación). En Mecánica de Suelos las deformaciones son positivas cuando la longitud final es menor que la inicial. Vea la figura 7.1.7. En esta figura se presenta una deformación positiva vertical.

$$\delta = \Delta H = -(H_f - H_o) = H_o - H_f$$

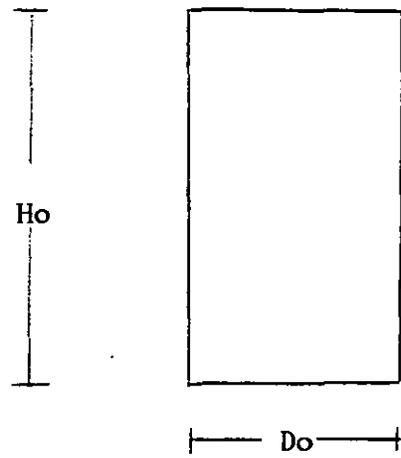
Se define como deformación unitaria a la relación entre la deformación y la longitud inicial. Se define con la letra griega " ε ".

$$\varepsilon = \frac{\delta}{H_o}$$

En las pruebas de compresión a probetas cilíndricas en suelos, se tiene que en ocasiones se tienen grandes deformaciones antes de la falla. En este caso se debe hacer una corrección del área transversal de la probeta. Si se acepta que la deformación se da para un volumen de probeta constante, se puede decir que el área que se va teniendo conforme avanza la deformación es:

$$A_c = \frac{A_o}{1 - \varepsilon}$$

Observe de nuevo la figura 7.1.7 . Aquí también se supone que el área transversal crece igual a todo lo largo de la probeta. Lo anterior no es cierto por problemas de esfuerzos que se tienen en los extremos de la probeta durante la prueba.



Dimensiones iniciales

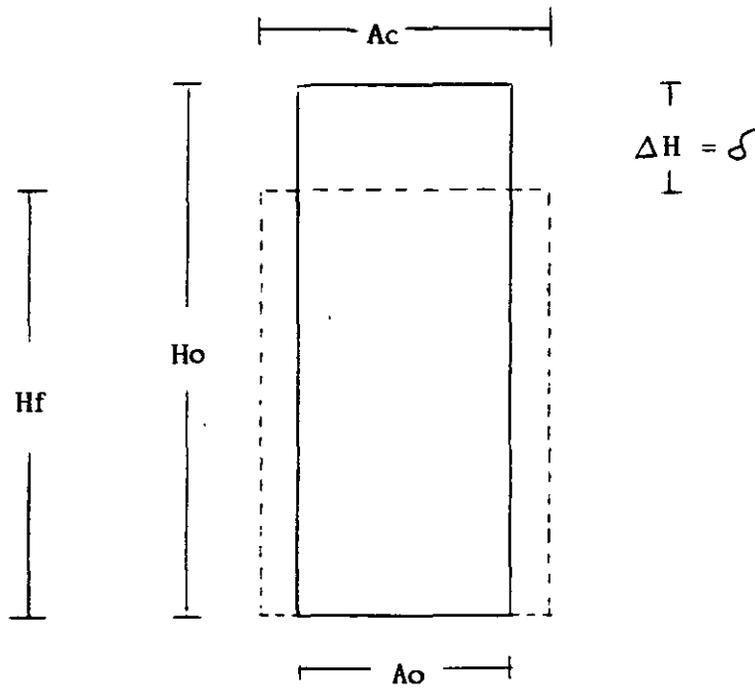


Fig. 7.1.7 Análisis de deformaciones en compresión

7.1.3 RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE DE LOS SUELOS.

En los suelos, se acepta que la resistencia se tiene siempre por una combinación de esfuerzo normal y cortante. Esta es la razón por la que estudiamos anteriormente como evaluar esfuerzos normal y cortante en forma gráfica. Esta combinación de esfuerzos es un punto en el plano de Mohr.

Las fallas reales en suelos, se acepta que nunca se dan por esfuerzo cortante puro (sin esfuerzo normal actuante). Tampoco se acepta que tengan resistencia a la tensión (la tensión la puede resistir el agua trabajando a tensión, o un mineral cementante en el suelo), ya que esta no es una condición confiable ni permanente. Esta es la razón por la que se estudia en suelos la resistencia al esfuerzo cortante (siempre combinado con un esfuerzo normal).

La propuesta clásica para analizar la resistencia de los suelos, es la de analizar la fricción en el plano de contacto de un bloque rugoso sobre un plano rugoso. Vea la figura 7.1.8. El esfuerzo normal se puede definir como :

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

y el esfuerzo cortante como:

$$\tau = \frac{T}{A}$$

El ángulo ϕ' es el ángulo que se desplaza la resultante R de la línea de acción del esfuerzo normal. Vea la figura 7.1.8. En Física Clásica se define como coeficiente de fricción estática a la relación entre T y P o entre τ y σ , y se define como μ , de modo que:

$$\mu = \frac{T}{P} = \frac{\tau}{\sigma} = \tan \phi'$$

Es por esta que la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo granular (a esfuerzos efectivos) se expresa como:

$$s = \tau_{\max} = \sigma \tan \phi'$$

Mas adelante se verán aplicaciones de esto en pruebas específicas de laboratorio.

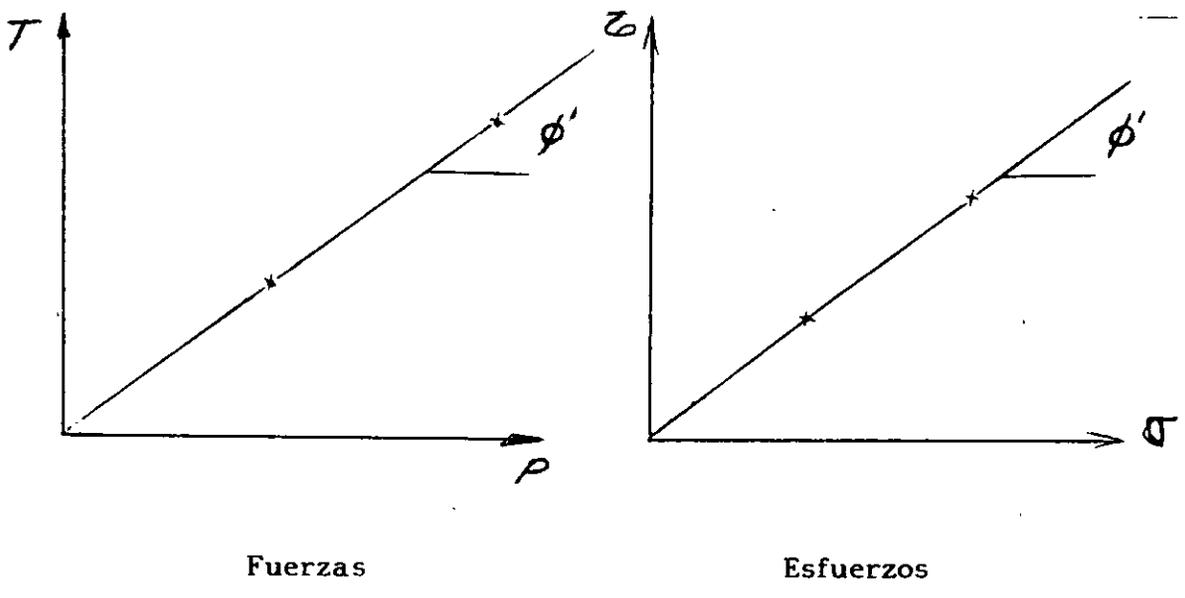
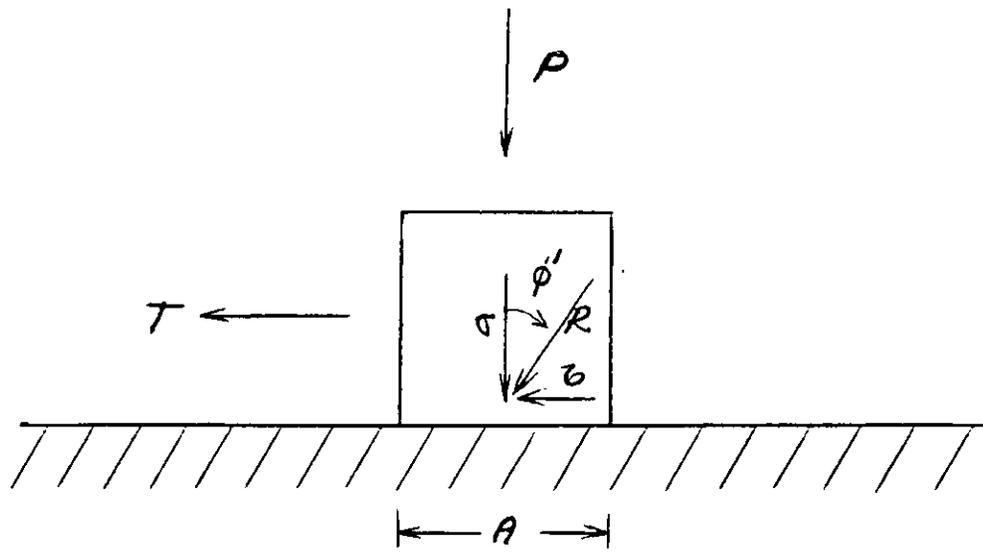


Fig. 7.1.8 Análisis de fricción

7.2 PRUEBAS DE CAMPO

PRUEBAS DE CAMPO

Existen intentos de pretender correlacionar dato obtenidos con las pruebas de sondeo del suelo en campo, con la resistencia de los suelos. Hay que aclarar que hasta el día de hoy no se ha logrado un éxito tal en este sentido, de tal forma que se pudiesen sustituir las pruebas de laboratorio.

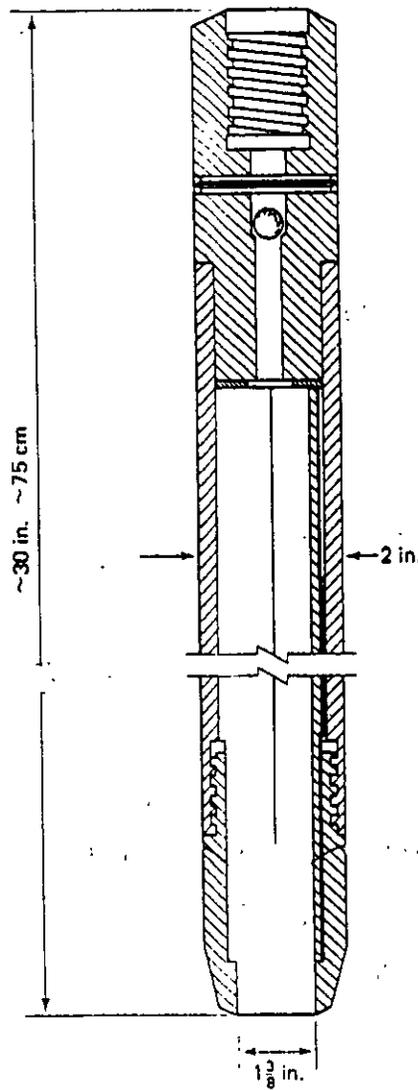
7.2.1 PRUEBAS DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR.

Esta prueba se usa para sondear al suelo, hincando por medio de golpes de martillo, una punta recuperadora de muestras alteradas, llamada penetrómetro estándar. Este penetrómetro consiste en una punta cortadora, de acero endurecido, seguida por un tubo de recuperación de dos cañas. Un diagrama de este equipo se muestra en la figura 7.2.1. En esta prueba se hace un conteo de golpes para penetrar tramos de 15 cm., en una secuencia total de 45 cm. De los resultados de este proceso, se suman el numero de golpes que se obtienen en los dos últimos tramos de 15 cm., de tal modo que se tiene el numero para penetrar 30 cm. A este dato final, se le llama numero de golpes (N).

Se han hecho correlaciones, que como se dijo antes se deben usar con sumo cuidado, para relacionar el valor del numero de golpes con la resistencia de arcillas y arenas.

En la figura 7.2.1 se muestra una propuesta para arcillas en base a la resistencia de éstas en pruebas de compresión simple (q_u).

En la figura 7.2.2 se muestra el caso para las arenas, donde en las dos primeras gráficas intentan obtener, ya sea por porcentajes de grava, arena y limo y datos de penetración la compacidad relativa del suelo granular; o ya sea en función del esfuerzo vertical y datos de penetración, también obtener la compacidad relativa. En base a esta compacidad, supuesta por estas gráficas, se puede uno dar una idea de la resistencia del suelo granular, en función del ángulo de fricción, utilizando la gráfica inferior de ésta figura.

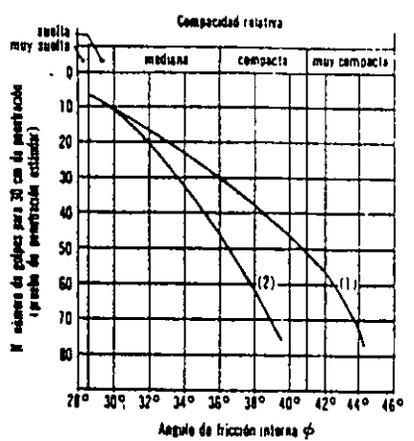
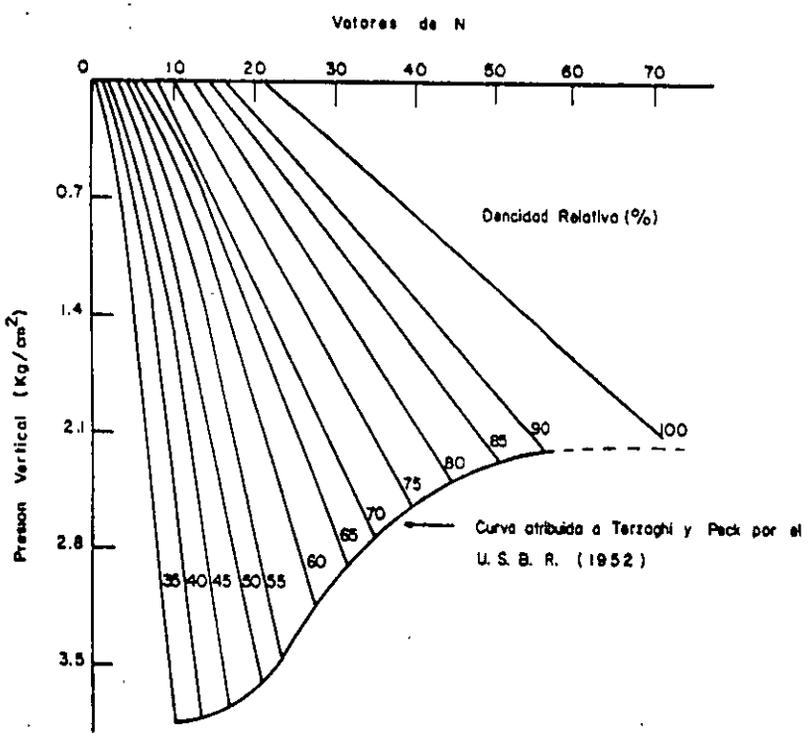
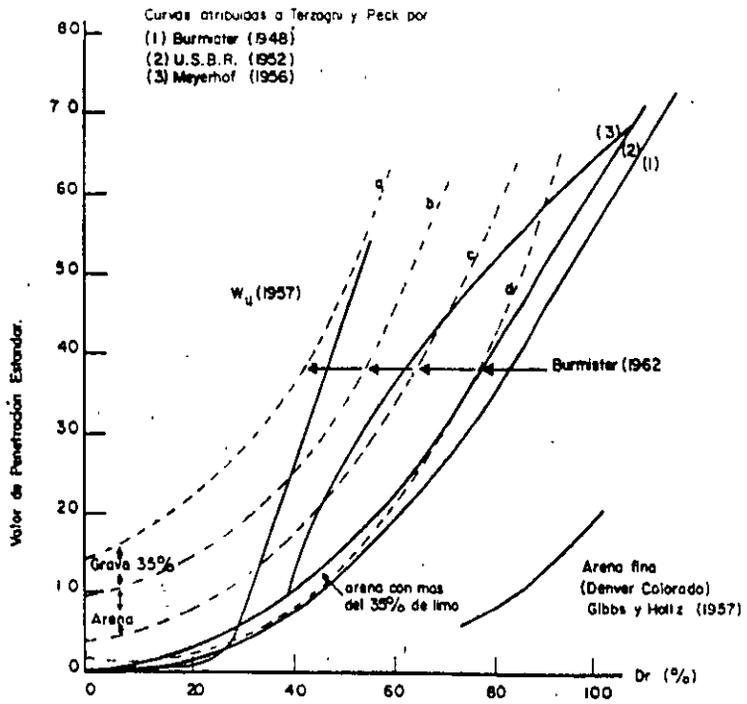


Penetrómetro estándar

| Consistencia | No. de golpes, N | Resistencia a la compresión simple, q_u |
|--------------|------------------|---|
| | | kg/cm ² |
| Muy blanda | < 2 | < 0.25 |
| Blanda | 2-4 | 0.25-0.50 |
| Media | 4-8 | 0.50-1.0 |
| Firme | 8-15 | 1.0 -2.0 |
| Muy firme | 15-30 | 2.0 -4.0 |
| Dura | > 30 | > 4.0 |

Resistencia aproximada en arcillas en base a la SPT

Fig. 7.2.1 Resistencia inferida a partir de la prueba de penetración

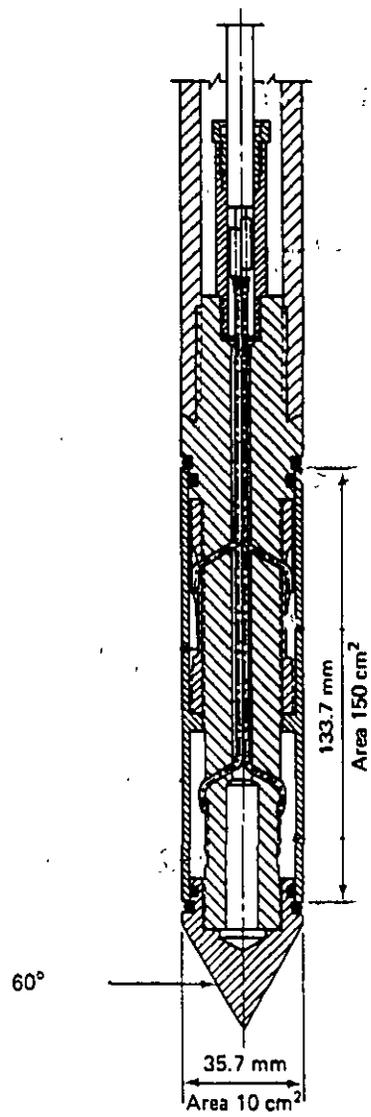


(1) Relación para arenas de grano angular o redondeado de mediano a grueso
 (2) Relación para arenas finas y para arenas limosas

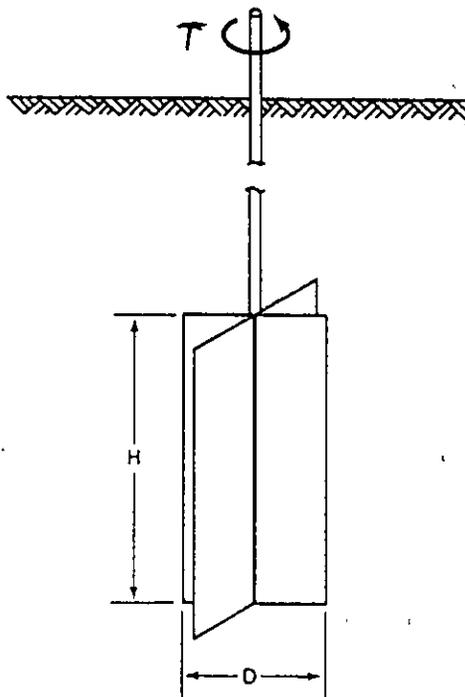
Fig. 7.2.2 Gráficas que permiten hacerse una idea de la resistencia de arenas con datos de la prueba SPT.

7.2.2 PRUEBA DE CONO HOLANDÉS.

Esta punta sondeadora, se hinca por medio de presión, y se va obteniendo la capacidad de carga, conforme va progresando el sondeo. En la figura 7.2.3 se muestra en la parte superior un esquema de un cono. La desventaja de este equipo es que no recupera muestras, sin embargo se puede utilizar combinado con otro método de penetración, cuando la estratigrafía, sea totalmente desconocida en la zona. Si se conoce que tipo de suelo corresponde a los datos obtenidos, se puede obtener la resistencia del suelo, expresada como ángulo de fricción interna o "cohesión", apoyándose en alguna teoría de capacidad de carga.



Cono holandés



Veleta de campo

Fig. 7.2.3 Cono holandés y veleta de campo

7.2.3 PRUEBA CON VELETA DE CAMPO

Esta prueba es relativamente fácil de realizar y se aplica a suelos finos. En la figura 7.2.3, se muestra, en la parte de abajo, el esquema de una veleta de campo. La veleta se hince verticalmente, haciendo que las cuchillas se profundicen en el suelo, de tal modo que quede un colchón de suelo superficial. A continuación, ya posicionada la veleta, se aplica un torque al eje de la veleta, como se indica en la figura, con un equipo que permita conocer el valor del torque máximo, que es el que corta al suelo. Con este dato y los datos geométricos de la veleta, se puede despejar por medio de una expresión muy fácil de demostrar, el valor de la "cohesión" del suelo fino. Esta prueba se aplica comúnmente al fondo de un pozo a cielo abierto.

7.3 PRUEBAS DE LABORATORIO

7.3.1 TORCÓMETRO Y PENETRÓMETRO DE BOLSILLO

Este tipo de instrumentos, permiten evaluar con cierta aproximación, la resistencia al esfuerzo cortante no drenada de suelos finos saturados. Este tipo de resistencia se obtiene formalmente, mediante una prueba triaxial UU. Las pruebas que se comentarán a continuación, se debe aplicar a muestras inalteradas confinadas (preferentemente a suelos muestreados en tubo Shelby). De tal forma que se pueda garantizar que la falla se sucede tan rápido, que no se permite el drenaje del suelo.

A esta resistencia se le denomina "cohesión" (C) o mas modernamente resistencia no drenada (S_u).

El torcómetro de bolsillo, como el mostrado en la figura 7.3.1, se compone de una miniveleta en la punta , un resorte de torsión y una perilla con una carátula indicadora, todos ellos unidos por un eje metálico. Algunos como el mostrado en la figura, viene equipados con varias veletas. La forma de efectuar la prueba, consiste en aplicarla al suelo, sin sacarlo del tubo Shelby, ya que así conserva su confinamiento. Se toma el torcómetro y se hunde en el suelo, lo mas alejado de las paredes del tubo. Ya que se hundió hasta el tope, se aplica una torsión rápida pero con sumo cuidado. En el momento de la falla, el resorte se descarga y en la carátula se puede leer el valor de la resistencia no drenada (C o S_u). En este curso se mostrara el torcómetro y se hará una experiencia practica.

El penetrómetro estándar, que se muestra en la figura 7.3.2, consiste en un mango cilíndrico, que tiene una punta móvil, dividida en la punta de penetración y la zona indicadora. Al igual que con el torcómetro, se recomienda que se aplique a los suelos contenidos en un tubo Shelby. La forma de proceder es la siguiente: El indicador del penetrómetro se coloca en cero; posteriormente se hinca en el suelo la punta de penetración hasta la marca; finalmente se lee el valor obtenido en la zona indicadora de la punta. En este instrumento se lee el resultado como resistencia a la compresión no drenada, dada como el esfuerzo desviador de falla, de modo que para conocer el valor de "cohesión" o de resistencia no drenada, se debe dividir lo obtenido entre dos.

El valor en laboratorio de estos instrumentos, consiste en que permiten calibrar la resistencia de los suelos, lo cual es muy útil, cuando se quiere programar una prueba triaxial o una de corte directo. Teniendo una idea del valor de la resistencia, se pueden elegir los instrumentos adecuados para una prueba formal (anillo de carga, marco de carga, etc.).

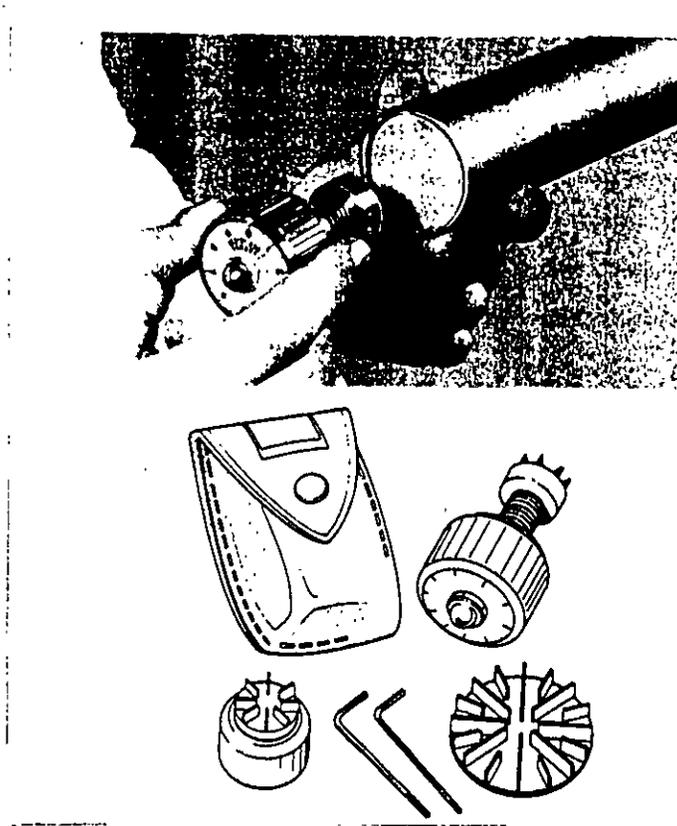


Fig. 7.3.1 Torcómetro de bolsillo



Fig. 7.3.2 Penetrómetro de bolsillo

7.3.2 PRUEBAS DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

En orden cronológico, se puede decir que la prueba más popular anteriormente, era la prueba de corte directo (que se comentara mas adelante). Sin embargo a partir de las investigaciones desarrolladas por Arturo Casagrande en el M.I.T., para desarrollar pruebas de compresión en probetas cilíndricas, se lograron superar algunas serias desventajas que se presentaba la prueba de corte directo.

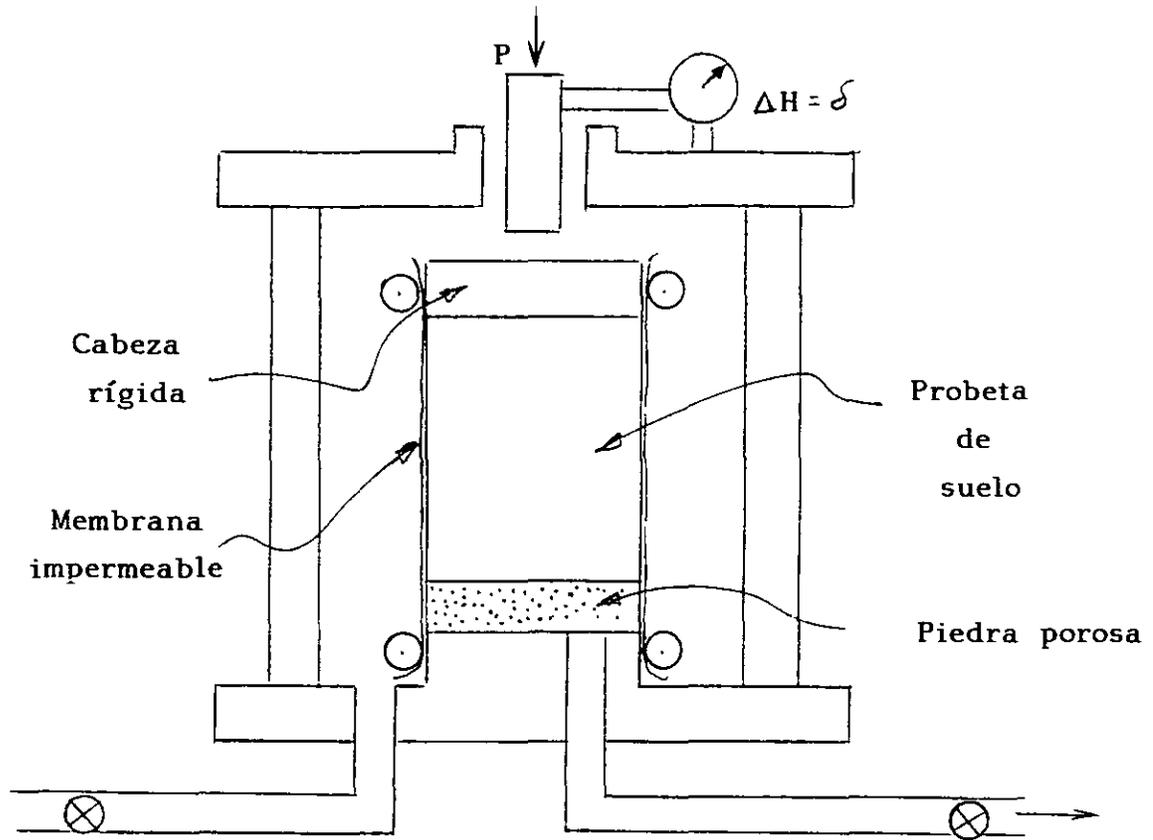
Actualmente la prueba triaxial es mas popular que la de corte directo. No obstante ser una prueba mas complicada, permite una gran variedad de condiciones de drenaje. También se puede suponer que permite aplicar todo el tiempo esfuerzos principales, de modo que no existe rotación de esfuerzos principales, como sucede con la de corte directo. Existen también concentraciones de esfuerzos, pero son mucho más bajos que en corte directo. Otra ventaja es que no tiene un plano predeterminado de falla, además de que se puede representar en el plano de Mohr como un solo circulo, sin dejar de representar a un estado de esfuerzo tridimensional perfecto.

En la figura 7.3.3, se presenta esquemáticamente una cámara triaxial y algunos de sus principios. A la probeta de suelo se le aísla, por medio de una membrana impermeable, la cual impide que el fluido confinante (comúnmente agua), penetre en los poros del suelo. La carga axial se aplica por medio de un vástago de acero, el cual debe tener muy poca fricción con la abertura de la cámara por la cual pasa. Existe un mecanismo fuera de la cámara que permite el movimiento del vástago, sin incrementar la presión confinante que se aplica a la probeta. La probeta se puede colocar entre piedras porosas, si se quiere permitir drenaje o medir presión de poro, o colocar una sola piedra porosa en la base de la probeta, como se muestra en la figura. En algún caso especial (prueba UU sin medición de presión de poro), se puede prescindir de colocar piedras porosas.

En la prueba triaxial, como se comentó antes, se puede suponer que se aplican esfuerzos principales en todo el cuerpo de la probeta. Esto no es del todo cierto, ya que pequeños esfuerzos cortantes pueden actuar en los extremos de la probeta. Este problema se ha tratado de resolver, colocando en el contacto con la probeta cabezas de teflón o engrasándolas.

En la notación que usaremos, se tomara como esfuerzo desviador a la diferencia entre el esfuerzo principal mayor y el principal menor, y lo denominaremos por $\Delta\sigma_a$. De modo que $\Delta\sigma_a = \sigma_1 - \sigma_3$. Para pruebas de compresión en la cámara triaxial se aceptara que $\sigma_c = \sigma_2 = \sigma_3$.

La prueba triaxial es una prueba más elaborada que la de corte directo, y por lo mismo más compleja. Es este tipo de prueba, al igual que en la de corte directo, se especifica con dos letras al tipo de prueba que se desea realizar, en función de las condiciones de drenaje, como sigue:



Presión del líquido confinante

Medición de cambio de volumen o presión de poro

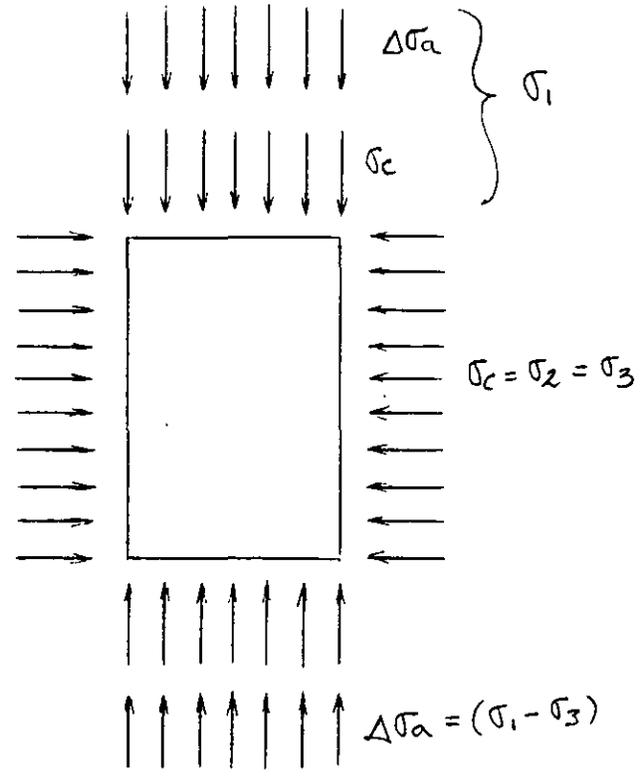


Fig. 7.3.3 Cámara triaxial y esfuerzos que aplica

CONDICIONES DE DRENAJE

| PRIMERA ETAPA | SEGUNDA ETAPA | SÍMBOLO |
|----------------|---------------|---------|
| Consolidada | Drenada | CD |
| Consolidada | No drenada | CU |
| No consolidada | No drenada | UU |

Las letras que componen los símbolos proceden de la primera palabra en inglés de **Consolidated** o **Unconsolidated**, para la primera etapa, y de **Drained** o **Undrained**, para la segunda etapa.

En la figura 7.3.4, se muestran las condiciones iniciales promedio de una probeta en la cámara triaxial, en una prueba CD, estudiada con análisis plano de esfuerzos y la presentación de Mohr que le corresponde. En la figura 7.3.5, se muestran las condiciones intermedias promedio de una probeta esforzada en la segunda etapa, pero sin llegar todavía a la falla. En la figura 7.3.6, se muestran las condiciones finales promedio de la probeta en el momento de la falla.

En la figura 7.3.7, se muestran las etapas de la prueba CD, y sus condiciones en esfuerzos totales y efectivos, correspondiendo a éstas un solo círculo, como se muestra en la parte baja. Aquí se define un ángulo de fricción interna en esfuerzos efectivos ϕ' .

En la figura 7.3.8, se muestran las etapas de una prueba CU, y sus condiciones en esfuerzos totales y efectivos, correspondiendo a estas dos círculos desplazados una distancia con valor u_r . Aquí se definen dos ángulos de fricción interna: uno aparente, definido por ϕ y otro en esfuerzos efectivos, prácticamente igual al que se obtendría en una prueba CD, definido por ϕ' .

En la figura 7.3.9, se muestran las condiciones de la primera y segunda etapas de una prueba UU, y sus condiciones en esfuerzos totales y efectivos. En el plano de Mohr de abajo, se indican las envolventes típicas y la resistencia en esfuerzos totales, definida por "C" y el ángulo de fricción interna real, definido por ϕ' .

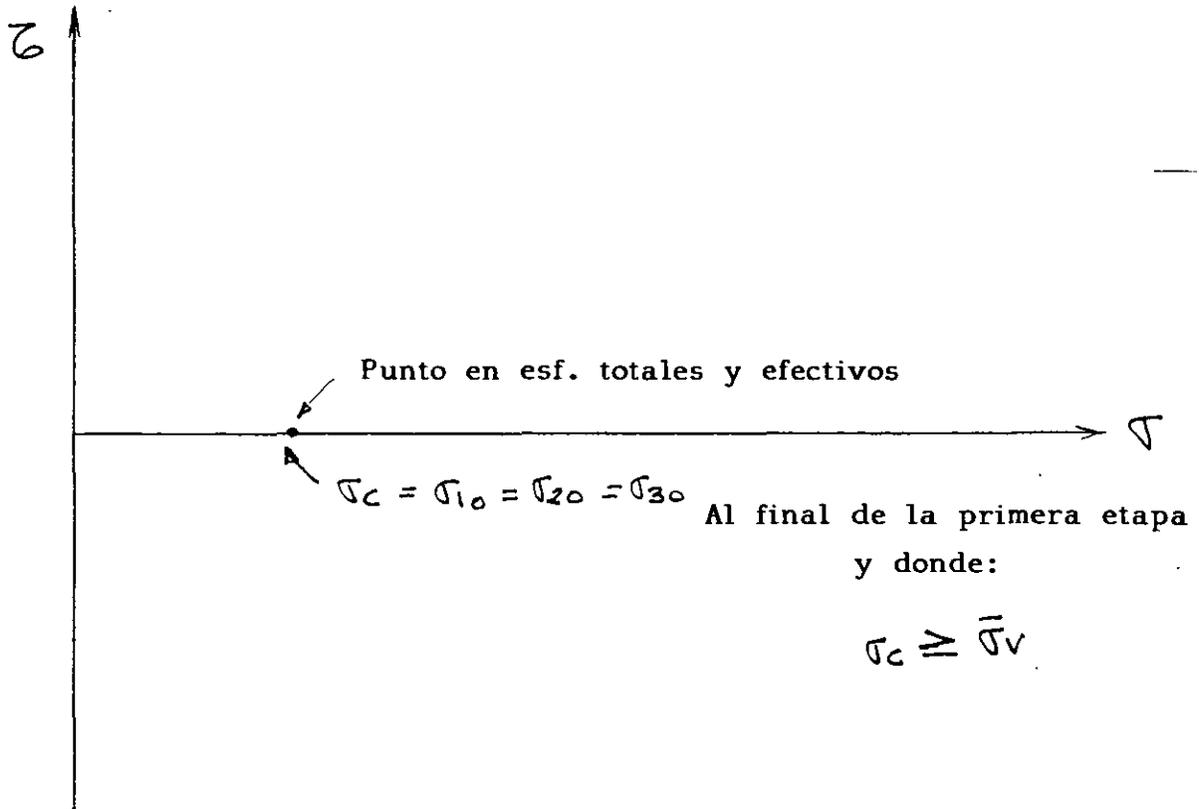
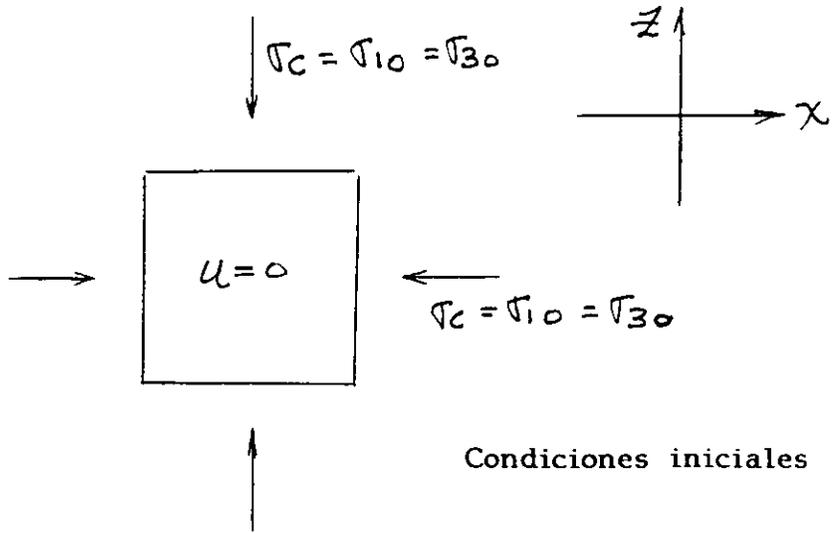


Fig. Condiciones iniciales en prueba triaxial CD (final primera etapa)
7.3.4

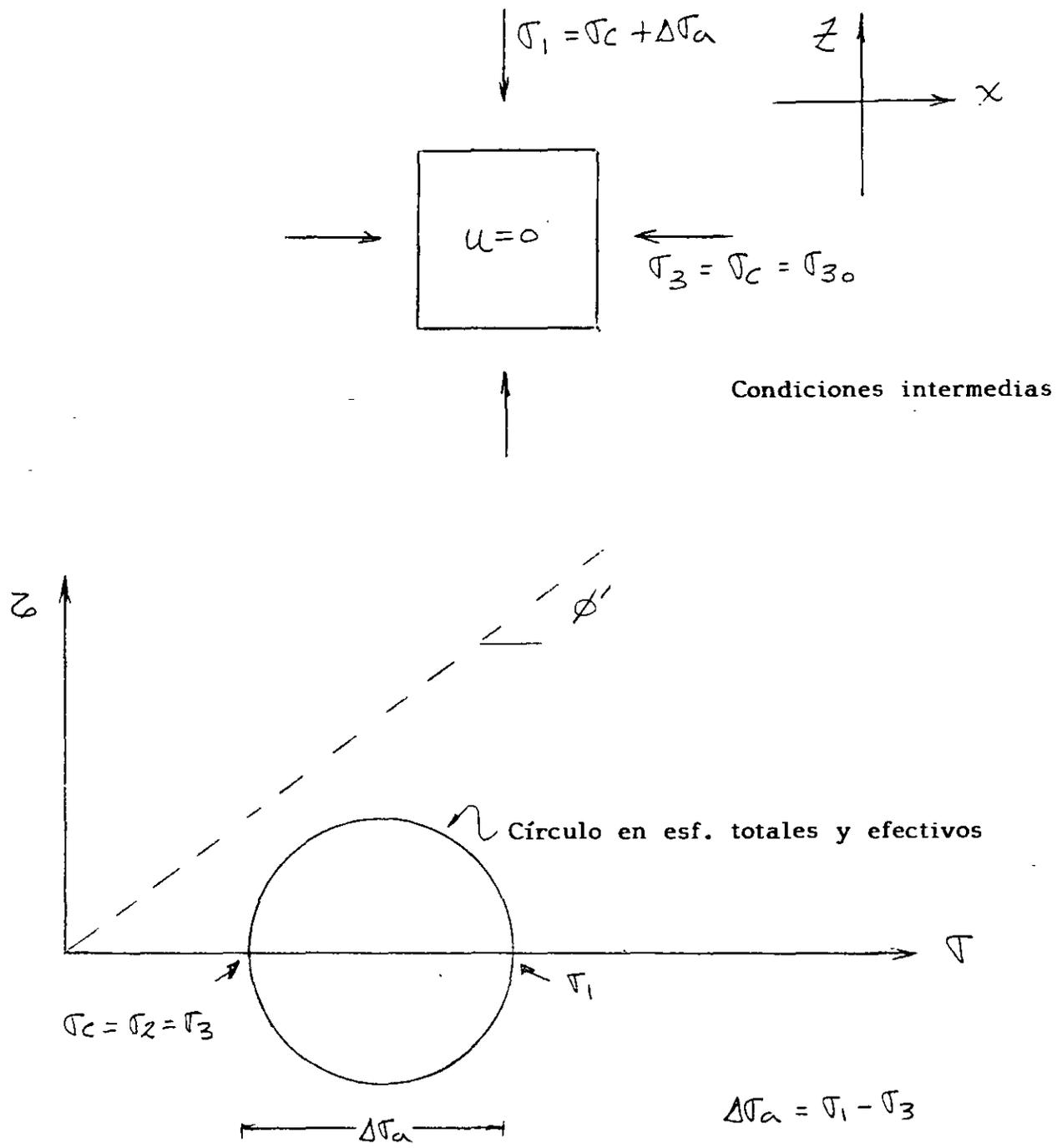


Fig. 7.3.5 Condiciones intermedias en prueba triaxial CD (2ª etapa)

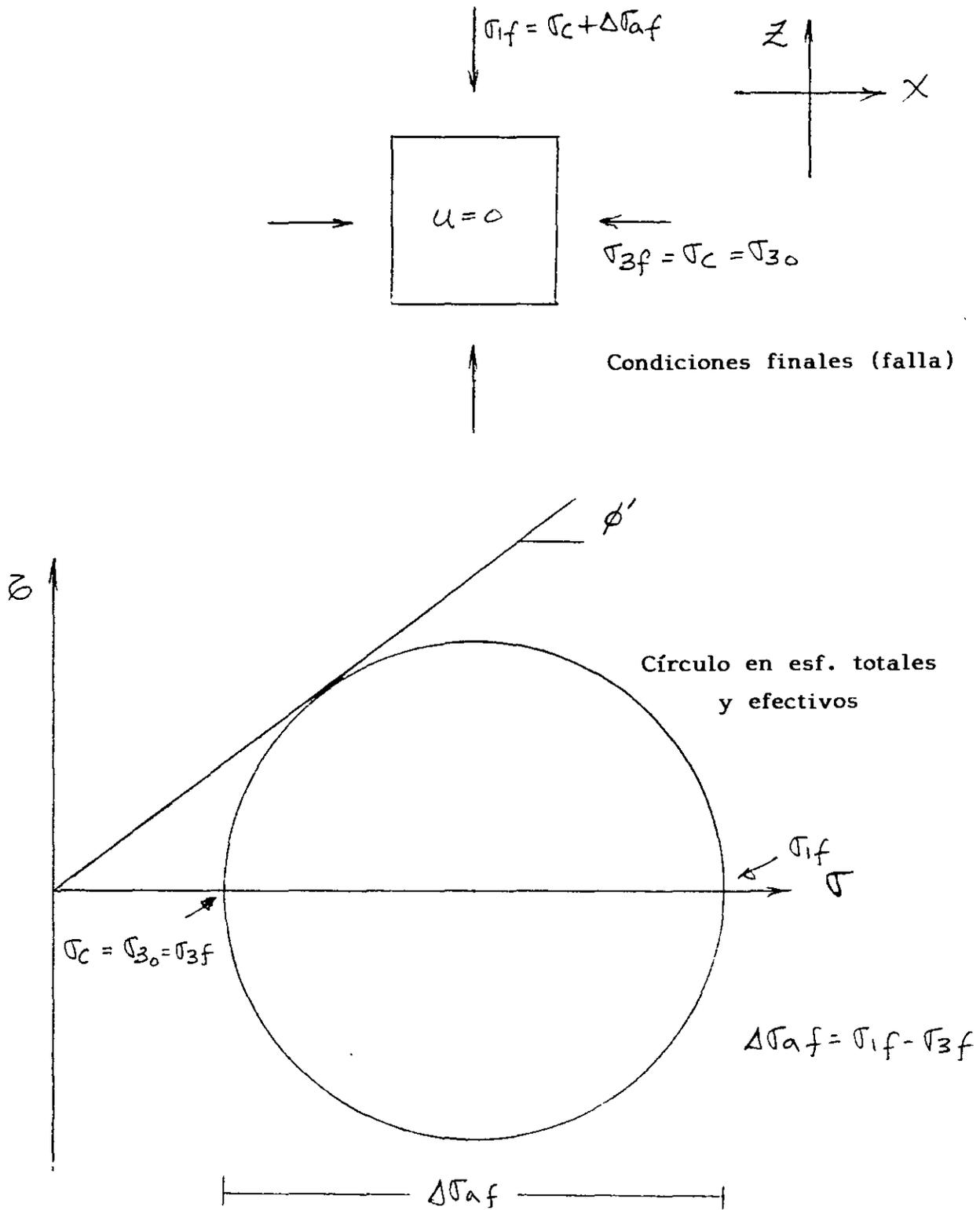


Fig. 7.3.6 Condiciones finales en prueba triaxial CD (2ª etapa)

1ª Etapa

2ª Etapa

Esfuerzos totales

Esfuerzos efectivos

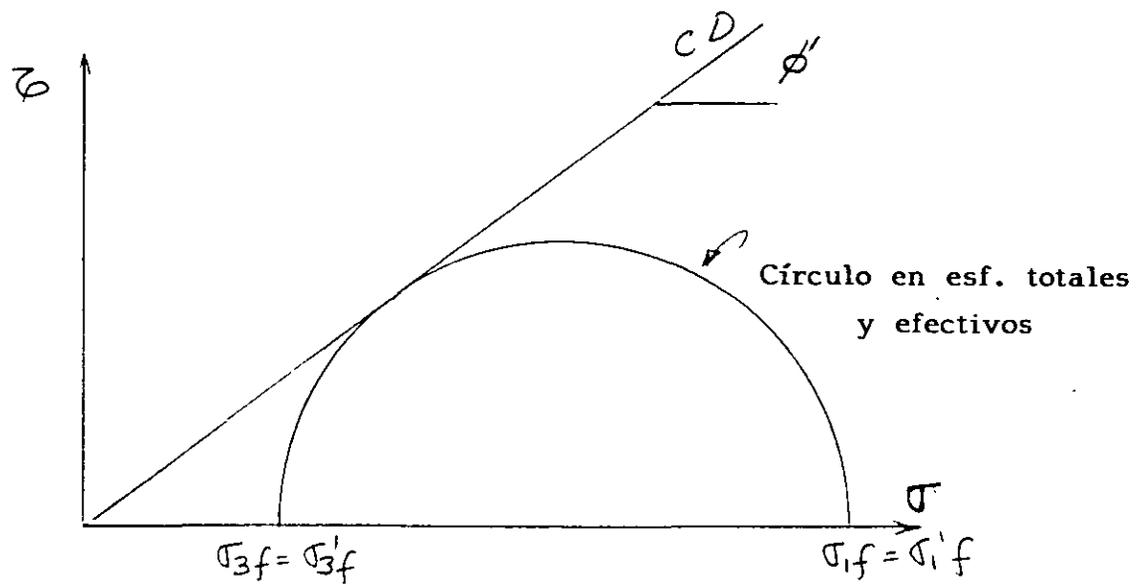
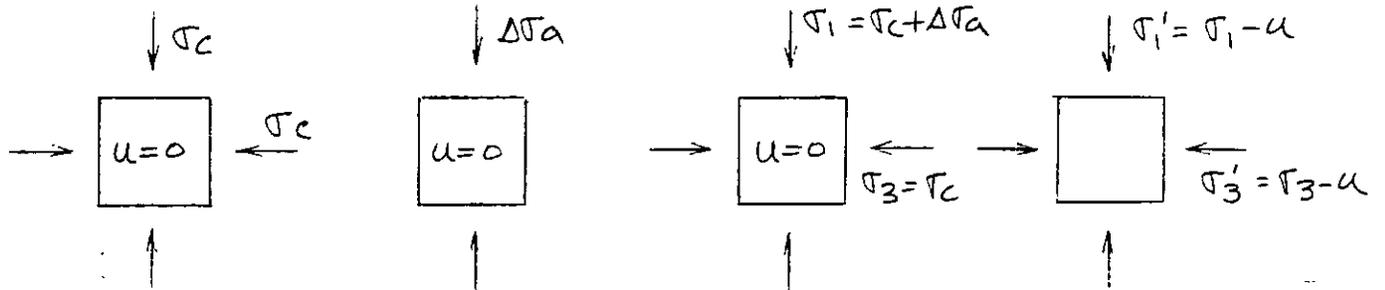


Fig. 7.3.7 Prueba triaxial de compresión CD

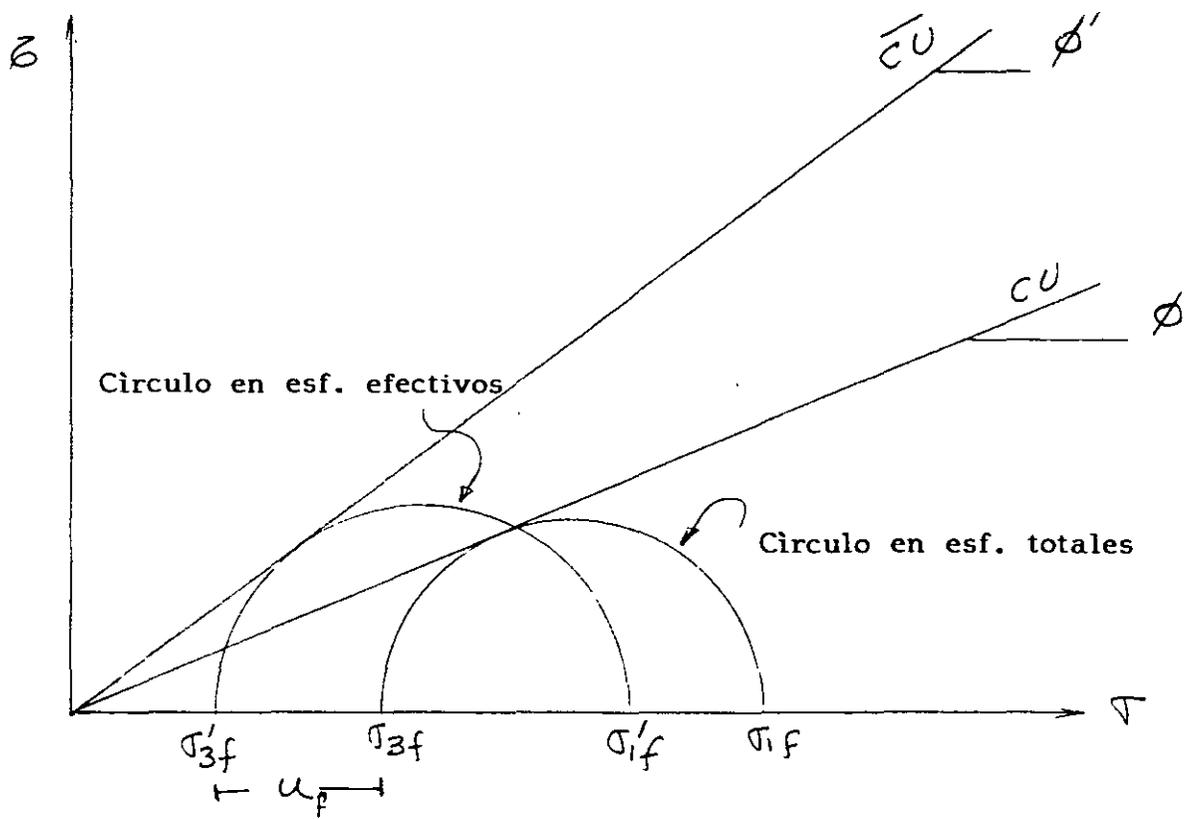
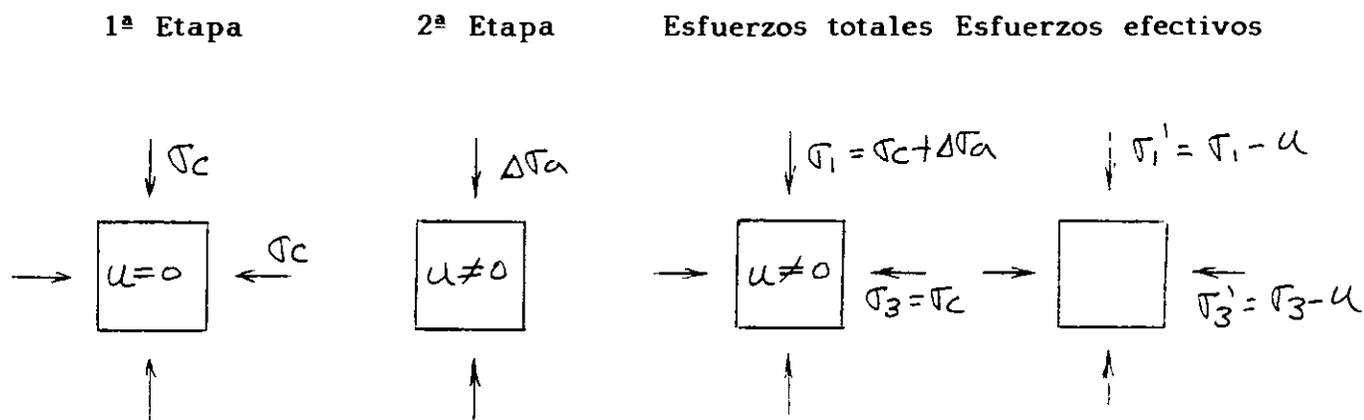


Fig. 7.3.8 Prueba triaxial de compresión CU

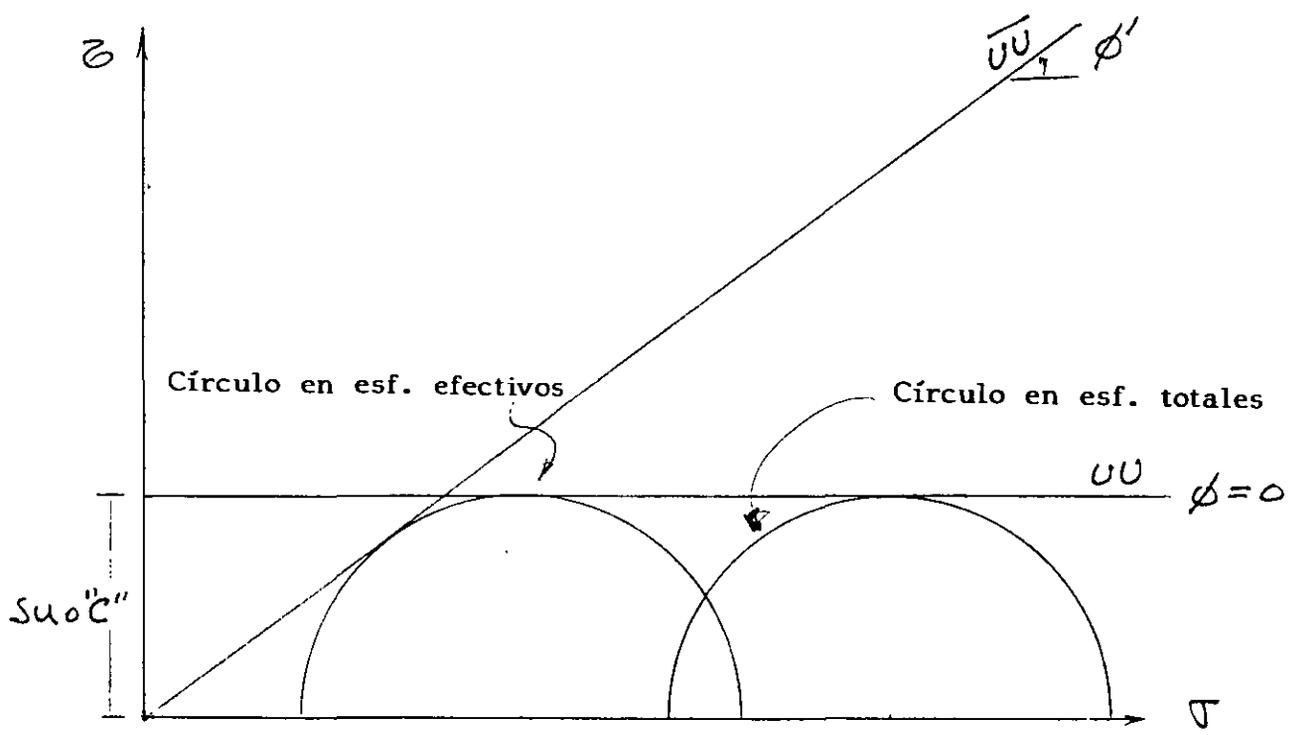
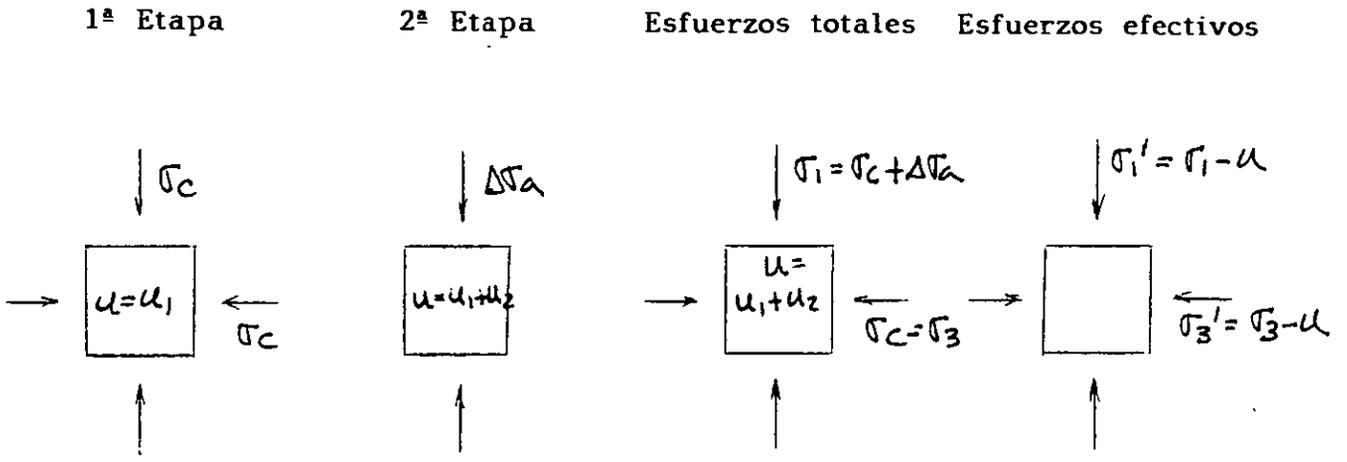


Fig. 7.3.9 Prueba triaxial de compresión UU

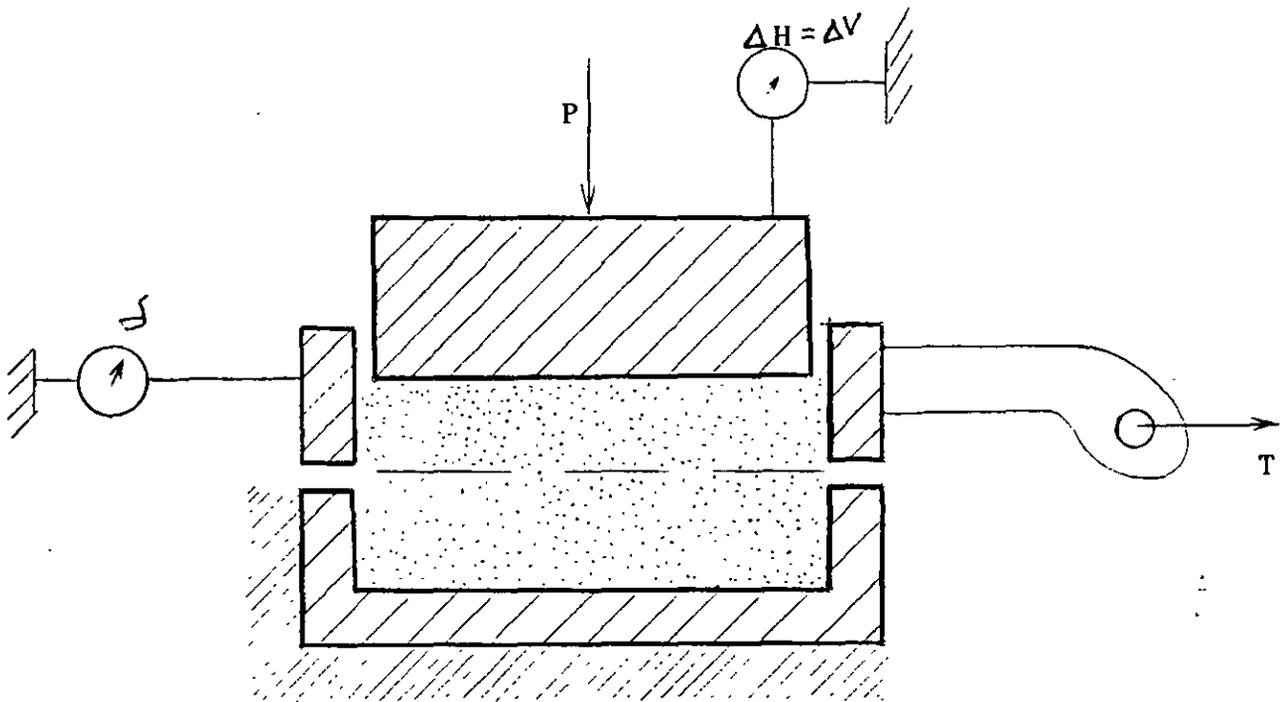
7.3.3 PRUEBAS DE CORTE DIRECTO.

Esta es una pruebas muy vieja para obtener la resistencia, ya que era usada por Coulomb hace más de 200 años. El principio que usa la prueba es en verdad muy simple. Consiste básicamente en una probeta de suelo contenida por una "caja de corte", la cual esta separada horizontalmente en dos partes. Una mitad se mantiene fija, respecto a otra mitad que se desliza horizontalmente. La carga normal P , se aplica a la probeta, a través de una placa rígida. Se miden durante la prueba: la carga horizontal, la deformación horizontal y la deformación vertical. Dividiendo la carga vertical y la carga horizontal, entre el área inicial de la probeta, se obtiene el esfuerzo normal y el cortante en el plano de falla. Es importante observar que el plano de falla se encuentra forzado, cuando se usa este aparato.

En la figura 7.3.10, se muestra un croquis de este equipo. Se muestra también el tipo de resultado que arroja esta prueba obtenidos en probetas de arena con la misma compacidad relativa. Cuando se grafican estos datos en el plano de Mohr, se puede obtener el ángulo de fricción interna.

En la prueba de corte directo, se pueden realizar en arcillas las mismas pruebas definidas por las condiciones de drenaje que en la prueba triaxial (CD, CU y UU).

En un análisis a esfuerzos efectivos (arena seca), se puede analizar un fenómeno interesante que se verifica en la prueba de corte directo y que se le llama " rotación de esfuerzos principales ". En la figura 7.3.11, se presentan las condiciones iniciales de la probeta en este tipo de prueba, y en la parte baja se muestra la representación de Mohr, aplicando el método del polo fijo. Observe la relación de los sistemas de referencia X Z y III I. En la figura 7.3.12, se muestran las condiciones intermedias, en el momento en que $\sigma_n = \sigma_h$. Observe para esta condición la relación de los sistemas X Z y III I. En la figura 7.3.13, se muestran las condiciones de la probeta en el momento de la falla. Observe que para esta condición σ_n se tiene que $\sigma_n > \sigma_{hf}$. Observe además la relación que guardan los sistemas X Z y III I. Finalmente observe la figura 7.3.14 . En esta se muestran juntas las condiciones inicial, intermedia y final, mostrando como se va sucediendo la rotación de los esfuerzos principales.



Aparato de corte directo

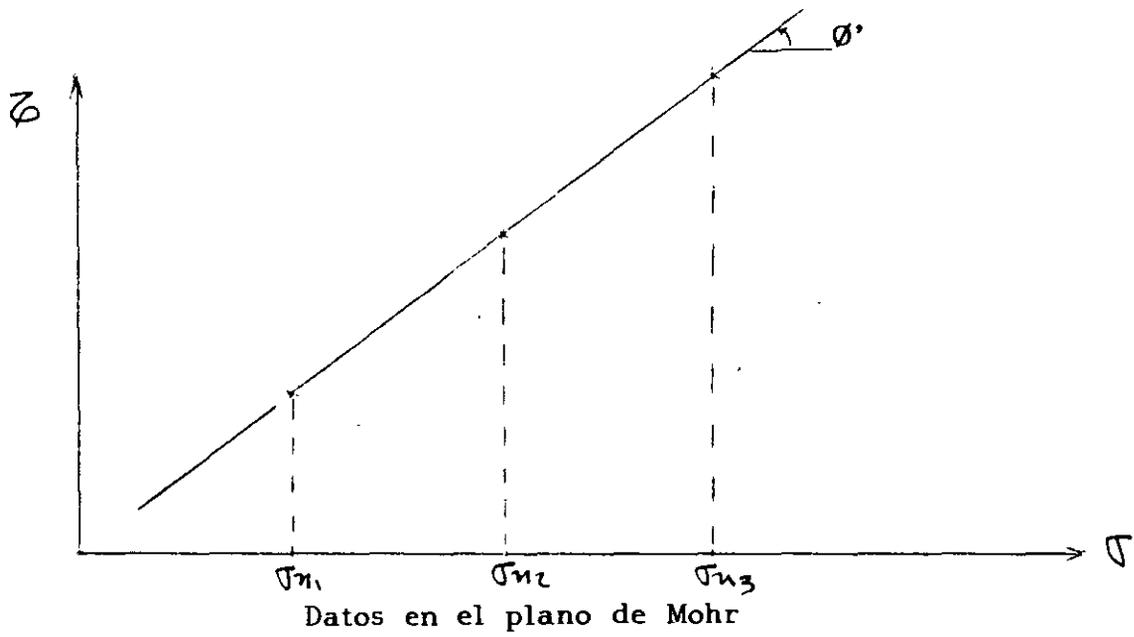


Fig. 7.3.10 Aparato de corte directo

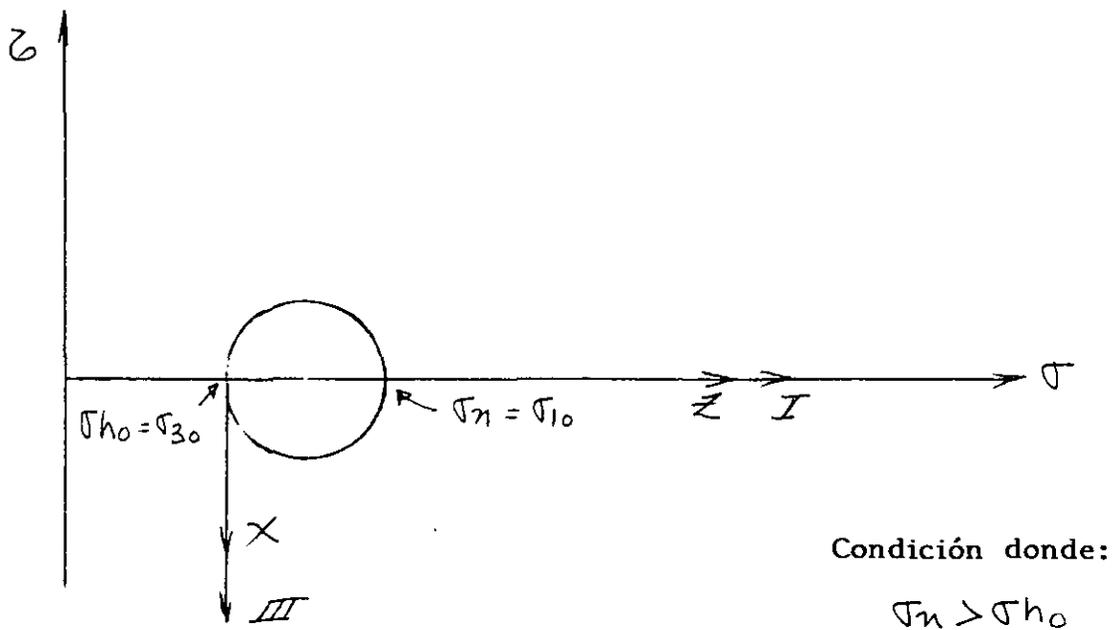
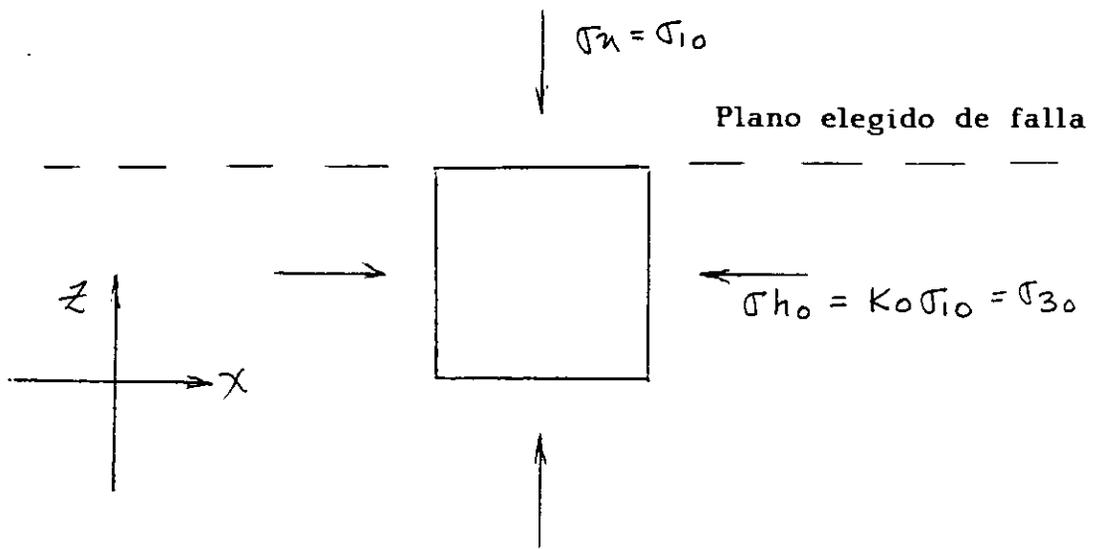


Fig. Condiciones iniciales en corte directo (primera etapa)
7.3.//

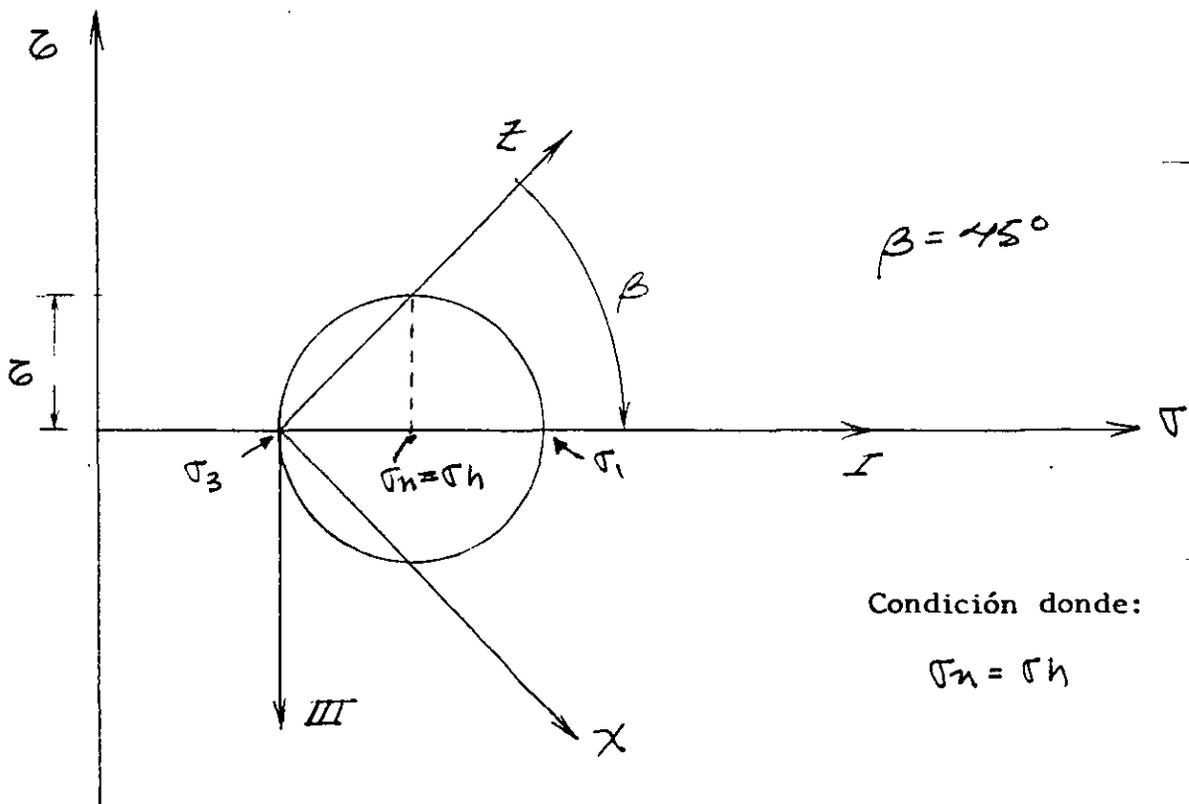
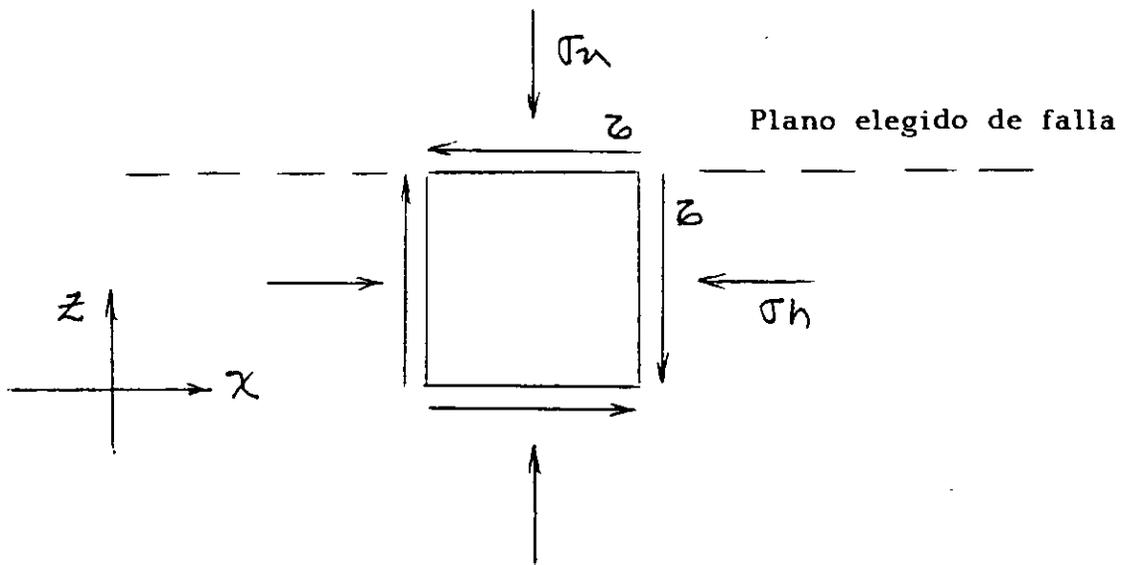


Fig. 7.3.12 Condiciones intermedias en corte directo (segunda etapa)

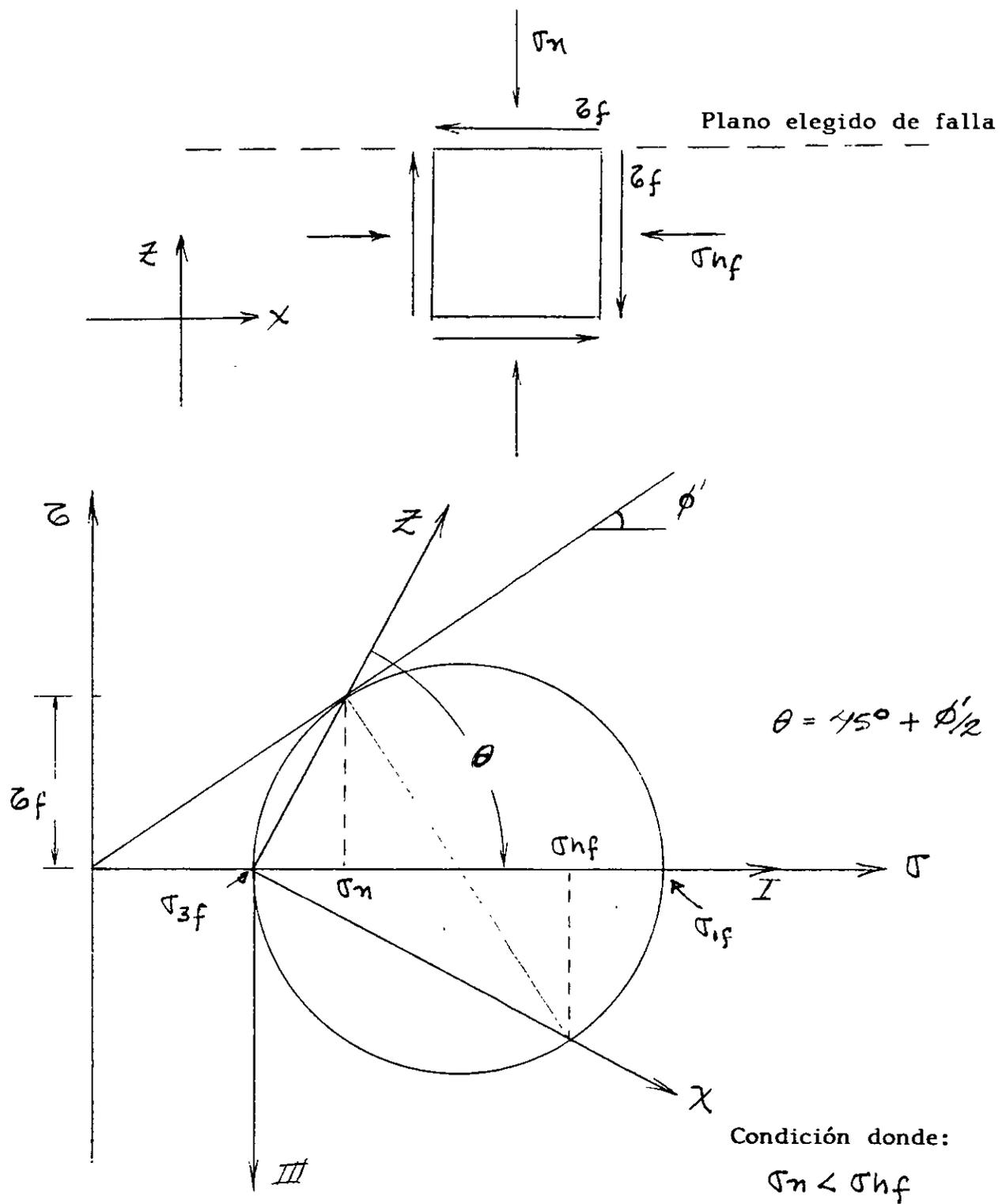


Fig. 7.3.13 Condiciones finales en corte directo (segunda etapa)

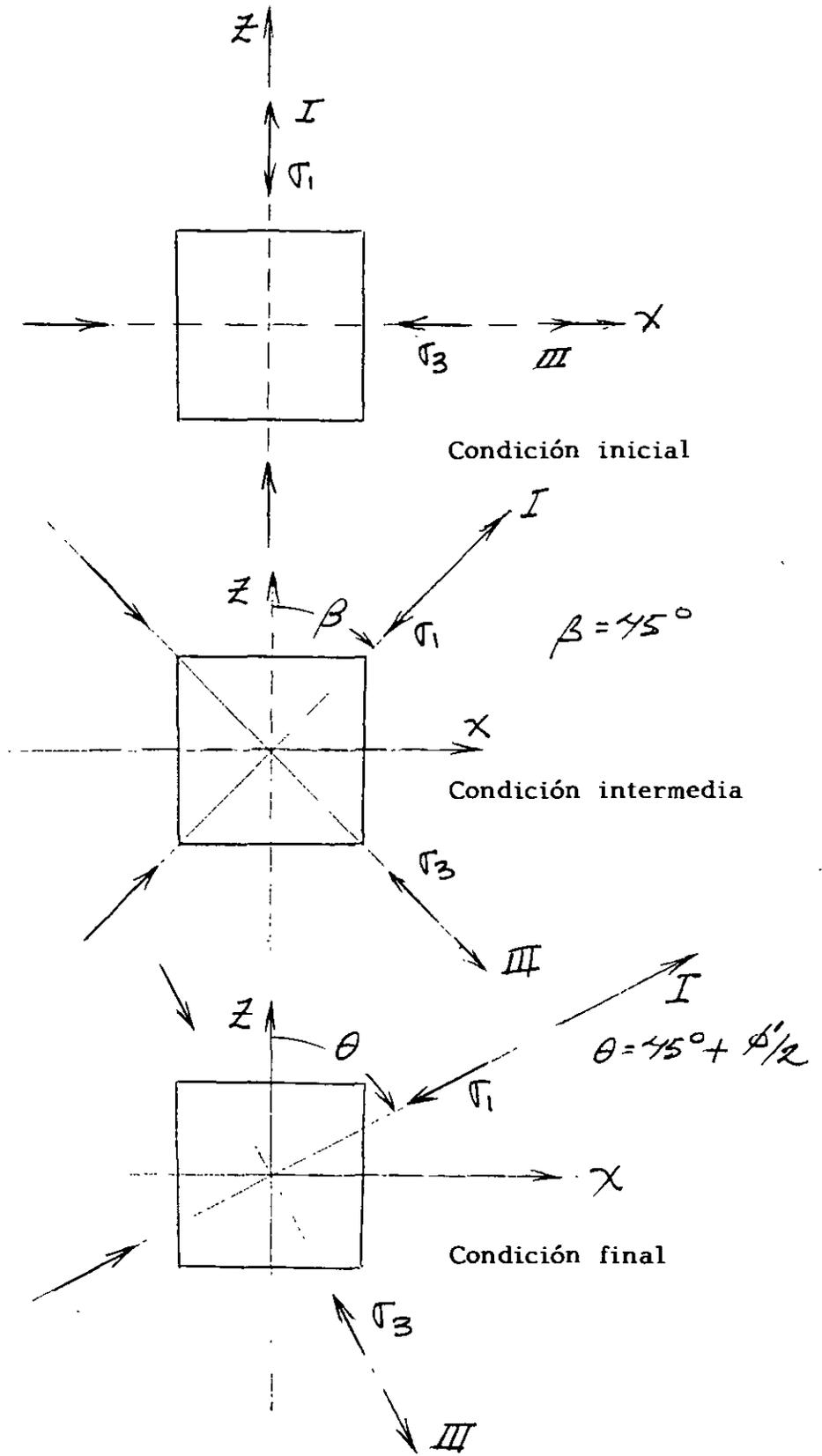


Fig. 7.3.14 Rotación de esfuerzos principales en corte directo

INSTRUCTIVO PARA REALIZAR UNA PRUEBA TRIAXIAL CD.

EQUIPO

1. Marco de carga.
2. Cámara triaxial.
3. Molde para formar la muestra.
4. Membranas impermeables.
5. Piedra porosa.
6. Bandas de hule (o rings o ligas).
7. Bomba de vacío.
8. Vernier.
9. Pipetas.
10. Cronómetro.

PROCEDIMIENTO

- 1.- Colocar una membrana impermeable en la base de carga de la cámara triaxial, fijándola con bandas de hule. Coloque una piedra porosa en la placa de base, saturándola previamente.
- 2.- Haber secado previamente arena y tener definido el peso y el volumen a lograr, para obtener la compacidad relativa deseada. Colocar el molde alrededor de la membrana y doblar esta, de modo que quede forrado la parte interior del molde. No debe haber bolsas ni dobleces. Conectar vacío al molde, tomando las precauciones para no romper la membrana. Conectar a la válvula de salida de la piedra porosa inferior, la manguera de la pipeta que abastecerá de agua a la probeta.
- 3.- Usar algún procedimiento conocido, para vaciar la arena en estado suelto. Compactar hasta lograr la compacidad deseada.
- 4.- Colocar la cabeza superior a la probeta y sellar la membrana contra ésta, por medio de banda de hule. Cuidar que la cabeza quede lo más horizontal posible.
- 5.- Bajar la pipeta, abriendo la válvula de la piedra inferior, para que la probeta experimente un vacío reducido.

6.- Quitar el molde y revisar el movimiento del agua en la pipeta, para cerciorarse de que la membrana está en buenas condiciones.

7.- Tomar las medidas de altura de probeta y diámetro de la misma, con sumo cuidado. Se debe decidir que valor se usa de H_0 y diámetro promedio para calcular A_0 .

8.- Colocar la parte superior de la cámara, cuidando que el vástago no tire la probeta recién formada. Apretar los tornillos, de modo que se tenga un sello adecuado en la cámara. Baje cuidadosamente el vástago, hasta que fije la cabeza de la probeta, para poder transportar la cámara.

9.- Coloque la cámara en el marco de carga, manteniendo la pipeta baja, para generar la tensión en la probeta. Centre la cámara y asegúrese que el vástago queda centrado con el anillo de carga (esto es necesario para que el anillo detenga el vástago, en caso de aplicar un confinamiento alto a la cámara, de otro modo, se saldría el vástago y parte del líquido confinante).

10.- Llene la cámara con el líquido confinante y aplique la presión deseada. Acerque el anillo de carga lentamente hasta tener un ligero movimiento en el extensómetro de éste. Lo anterior indica el contacto del anillo con el vástago.

11.- Coloque el extensómetro que medirá la deformación de la probeta. Tome la lectura inicial de éste.

12.- Aplique el primer incremento de carga y arranque el cronómetro. Espere un minuto para aplicar el siguiente incremento (este tiempo se da para que se libere la presión de poro en la arena y garantizar que en verdad es una prueba CD).

13.- Continúe aplicando incrementos hasta la falla de la probeta.

14.- Dibuje el plano de la falla si lo hay.

15.- Elimine la presión de la cámara y baje el líquido confinante. Recupere la probeta y métala al horno.

INSTRUCTIVO PARA LA PRUEBA DE CORTE DIRECTO.

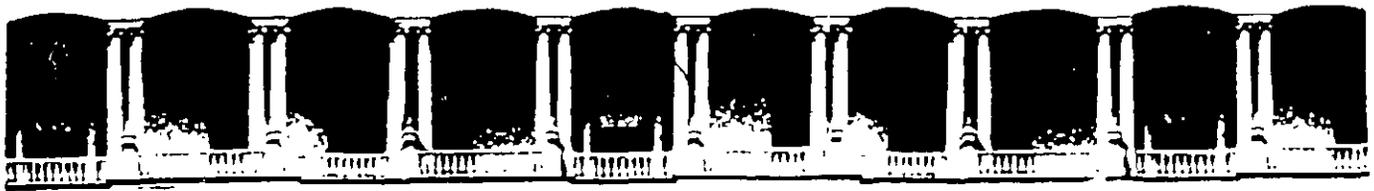
EQUIPO

1. Aparato de corte directo.
2. Balanza con exactitud de 0.01 gr.
3. Horno para secar el suelo.
4. Vernier.
5. Cronómetro.

PROCEDIMIENTO.

- 1.- Secar en el horno una cantidad suficiente de arena, para realizar la prueba. Previamente se deben haber obtenido los pesos específicos secos, para las condiciones más sueltas y más compacta de esa arena. Se debe decidir, que compactación se le dará a la arena, ya que el ángulo de fricción interna de las arenas depende de ésta.
- 2.- Armar la caja de corte y con el Vernier obtener las medidas interiores de ésta, para conocer el área transversal que se va a considerar.
- 3.- Vaciar la arena a volteo, conociendo el peso que debe tener la probeta de arena, para que alcance la compactación deseada. Al compactar, deberá quedar la arena a aproximadamente 5 mm. del borde. Se colocará después el émbolo rígido que transmitirá la carga. Se deberá cuidar que ésta placa quede lo más horizontal posible.
- 4.- Aplicar la carga vertical, de modo que se logre el esfuerzo vertical deseado. Coloque el extensómetro que medirá el desplazamiento vertical.
- 5.- Separar por medio de los tornillos del equipo, las dos placas que componen la caja de corte. La separación debe ser un poco mayor que la mitad de la partícula más grande en la probeta de suelo.
- 6.- Ajuste el extensómetro horizontal que medirá el desplazamiento entre las dos partes de la caja de corte.
- 7.- Aplicar la primera carga horizontal y medir con el cronómetro un minuto, a partir del inicio. Para lo anterior se debe haber programado la prueba, de tal modo que se llegue a la falla, en por lo menos diez incrementos.

8.- Repetir los pasos anteriores, para esfuerzos verticales diferentes del anterior, para tener por lo menos tres puntos en el plano de Mohr. Se recomienda doblar los esfuerzos. En arena seca, la línea de resistencia debe apuntar al origen del plano de Mohr.



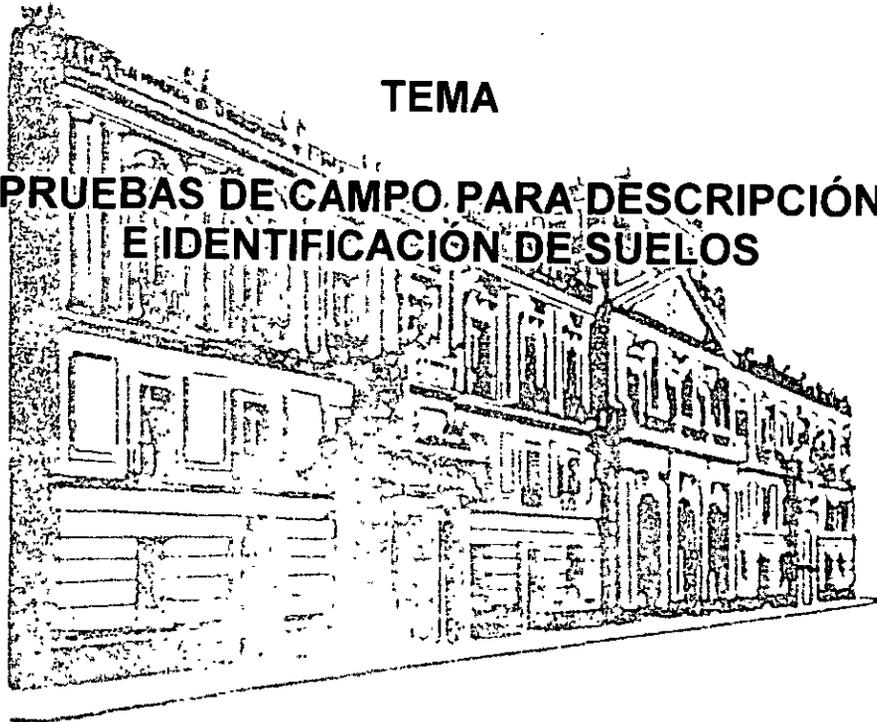
**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS I

TEMA

**PRUEBAS DE CAMPO PARA DESCRIPCIÓN
E IDENTIFICACIÓN DE SUELOS**



**CONFERENCISTA
DR. GABRIEL AUVINET G.
PALACIO DE MINERÍA
MAYO 2000**

DESARROLLO HISTORICO DE LA INGENIERIA GEOLOGICA EN MEXICO

EL PRINCIPIO DE LA HISTORIA

Durante el período prehispánico (200 a.c. a 1521 d.c.), los mayas y los aztecas construyeron las monumentales pirámides de Teotihuacan, Chichen Itza y El Tajin, ejemplificando las primeras aplicaciones de los conceptos geológicos y los principios de construcción. Obviamente ellos conocieron los problemas que estas pesadas construcciones podían ocasionar cuando se encontraban sobre rocas suaves o suclos y como conducir agua a las represas para la irrigación del cultivo del maíz.

Con la llegada de los españoles llegó la conquista (1519 a 1521) y los tiempos de la colonia (1540 a 1800) cuando la mayor parte del Imperio Azteca fue enterrado y sus conocimientos fundamentales de ingeniería se perdieron. Una nueva ciudad fue construida sobre Tenochtitlan. La historia posterior es dividida dentro de otros períodos tal como la Independencia (1810), el

intervalo del Imperio (1867) y la Revolución (1910). En estos períodos muchas estructuras fueron construidas por españoles y franceses, técnicos que ignoraban el comportamiento y las propiedades geológicas del subsuelo mexicano; éstos enfrentaron problemas relacionados con asentamientos, baja capacidad de carga, inestabilidad de taludes y otros, que no pudieron reconocer ni corregir.

La industria minera tuvo un gran desarrollo como resultado de la exploración española por oro y plata. A pesar de esto, los procesos de minería fueron inicialmente primitivos y rústicos, existiendo muchísimos distritos mineros en el país. En 1798 la tecnología involucrada llegó a ser tan desarrollada que se escribió un tratado acerca de la minería en México, y algunos años después 1825, el tratado fue distribuido ampliamente por miembros de la profesión minera, incluso en Europa. Esta fama por la magnificencia de la ingeniería en las minas de México se debió a los ingenieros de minas de España, que entrenaron a otros en el Real Seminario de Minería fundado en 1792. Estos ingenieros aplicaron sus conocimientos de ingeniería para los trabajos de minería subterránea, presas de almacenamiento y construcciones de represas o bordos

para otras empresas mineras, y algunos proyectos locales de irrigación. De este modo los estados de Aguascalientes, Chihuahua, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, México, Michoacán, San Luis Potosí y Zacatecas cuentan hoy en día con muchas obras de ingeniería de esa época que están aún en uso. Estas incluyen minas pequeñas, proyectos de irrigación, puentes y carreteras. Estas obras han perdurado por centurias, si bien muchas están ahora abandonadas, sujetas a la intemperie, deterioro o están completamente en ruinas. Sin embargo, las obras y los sitios son reliquias de la buena ingeniería y conceptos geológicos aún intactos. La mayoría de éstas representan la euforia de la empresa privada, tal como las presas y embalses de Saucillo (1730), Yuriria (1850), San Martín (1765), Torre Blanca (1850), Mal Paso (1865) y La Mula (1868); muchas otras se distribuyen en algunos de los estados previamente mencionados. Menos de 20 presas antiguas están aún en operación, si bien dañadas con azolve de sedimentos.

La mayoría de las vías férreas que atraviesan México fueron construidas entre 1873 y 1936. Seis mil kilómetros de carpetas de carreteras atraviesan cadenas montañosas, por medio de túneles y grandes cortes en precipicios; la

aplicación de la geología fue implementada para el diseño de y construcción, Sistemas de canales hidráulicos fueron desarrollados entre los años 1925 y 1930 con la creación de la Comisión Nacional de Irrigación. El diseño de la presa La Boquilla, una presa de mampostería de gravedad (74 m de altura, con un embalse de 30 millones de metros cúbicos), la más grande del mundo de su tipo, concluida en 1916, fue una hazaña de gran importancia con la aplicación de la geología.

ACTIVIDAD MODERNA

Antes de 1930, muchas carreteras pavimentadas y no pavimentadas fueron construidas para comunicar la Ciudad de México y otras ciudades importantes. La carretera más importante fue la de Monterrey a Nuevo Laredo y Texas, que se comunica con carreteras de EUA. Esta hazaña de ingeniería requirió de un estudio geológico planificado para atravesar precipicios, montañas, cañones profundos y grandes ríos.

En los años 30's, la Comisión Nacional de Irrigación construyó muchas presas grandes. La Presa Don Martín o Presa Venustiano Carranza, construida de 1928 a

1932 en el estado de Coahuila, fue la primera en el mundo que utilizó muros de gravedad en su cortina; siendo construida solo después de una gran investigación de las condiciones geológicas importantes para el diseño ingenieril de Paul Waitz, un geólogo suizo y naturalizado ciudadano mexicano. La Presa Calles en Aguascalientes, terminada en 1931, fue la primera presa de arco-gravedad construida en México (67 m de altura); siendo seguida más tarde por la Presa Endho en el estado de Hidalgo.

Durante los años 30's y 40's, la geología fue aplicada con poca experiencia profesional en la construcción de presas pequeñas de tierra y concreto, caminos y puentes, muchos de las cuales han sido asociados con la minería en México. Este grupo incluye a los geólogos De la O. Carreño, Heins Lesser Johns y Lorenzo Torres I. y los ingenieros mineros M. Alvarez Carvajal y Mario Veytia. Durante este periodo, el primer laboratorio de mecánica de suelos para fines de construcción de caminos fue instalado en la Ciudad de México por la Secretaría de Obras Públicas (SOP) y un laboratorio de pruebas de concretos fue organizado por la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SAR). Más tarde fue la primera institución técnica dedicada

principalmente a la construcción de presas.

Las investigaciones de sitios para cortinas y excavaciones profundas para cimentaciones fueron evaluadas por los primeros geólogos para caracterizar el sitio para los ingenieros civiles y organizar sus construcciones, pero otros requisitos geológicos no fueron hechos de las condiciones del sitio. En pocos casos, los geólogos visitaban un sitio para resolver un problema específico encontrado durante la construcción.

Durante los años 50's la Comisión Federal de Electricidad (CFE) empezó a trabajar en el campo de la geología aplicada para sitios de presas, exploración de carbón, plantas termoeléctricas y geotérmicas. La práctica de la ingeniería geológica e ingeniería geotécnica empezó en gran escala en 1954, con la ayuda de diseñadores y tecnología italiana, cuando la primera gran presa de arco fue diseñada por CFE y empezó su construcción. Para satisfacer las demandas inmediatas los ingenieros mexicanos tuvieron necesidad de aprender como los conocimientos geológicos eran aplicados para cumplir los requerimientos de los estudios necesarios de factibilidad, y como éstos se involucraban con las presas

de arco de Apuico en el estado de Puebla, la presa de Santa Rosa en el estado de Jalisco, y la presa El Novillo en el estado de Sonora. Para las primeras investigaciones, los estudios de mecánica de rocas fueron realizados por técnicos italianos pero para los años 60's, ingenieros mexicanos fueron competentes en estos menesteres recibiendo enterenamiento en los EUA y Europa.

Cuando la construcción de grandes presas de arco y tierra, junto con grandes excavaciones subterráneas, iniciaron en México, algunas sociedades técnicas y algunos programas de entrenamiento de las universidades fueron emitidos en la Capital. La Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) empezó ofreciendo el grado de maestría en ingeniería en 1957. Después de esto, los cursos de mecánica de suelos fueron reforzados y fueron muy benéficos para los ingenieros civiles involucrados en el campo de la construcción. En 1958, el director asistente de la Secretaría de Obras Públicas (SOP) fundó el Instituto de Ingeniería y la División de Estudios de Posgrado de la UNAM, donde los estudios de modelos hidráulicos y análisis de riesgo sísmico fueron ejecutados. A través de éstas investigaciones y soporte académico, la SOP construyó

20,137 km de caminos y los grandes puentes en México como el Coatzacoalcos y Alvarado en el estado de Veracruz.

En 1961, la mecánica de suelos fue el sujeto líder en la amplia categoría de ingeniería geotécnica en México. Para satisfacer los servicios técnicos disponibles CFE fundó el Laboratorio de Estudios Experimentales en 1964; investigaciones en mecánica de rocas y suelos fueron realizados así como pruebas de concretos y materiales. En 1967 los grandes equipos para ensayos de muestras en roca en México (1m²) entraron en operación en los laboratorios de la Universidad en la ciudad de México.

Con la construcción de grandes presas por todo México en los años 60's los geólogos de la CFE se preguntaron como manejar con estos estudios especiales el muestreo rocoso en cimentaciones, supervisión de pantallas impermeables y anclaje de macizos rocosos para su estabilidad. Este fue el inicio de la ingeniería geológica de hoy en día para la aplicación de la geología en México trabajando con problemas diversos de estabilidad de taludes, tratamiento de cimentaciones y problemas de excavaciones subterráneas a gran escala. Tales investigaciones de

campo dirigieron a los geólogos de CFE para introducir las pruebas de campo de permeabilidad tipo Lugeon para evaluar las unidades rocosas de sitios de presas y el potencial de filtración y/o flujos bypass.

En los últimos 25 años, la aplicación de la geología y la geofísica en trabajos de ingeniería ha llegado a altos grados de desarrollo en México. Esto ha incluido el incremento de la responsabilidad para los geólogos y geofísicos mexicanos en la planeación y construcción de las grandes presas hidroeléctricas sobre el río Usumacinta como Malpaso, Chicoasén y Angostura en el estado de Chiapas; como en El Infiernillo y El Caracol en el estado de Guerrero; sobre el río Bravo (México-EUA) la presa Falcón y La Amistad; y más recientemente el sistema del drenaje profundo de la Ciudad de México. De igual forma los geólogos mexicanos han sido involucrados en la construcción y mantenimiento de las supercarreteras; carreteras secundarias; grandes puentes a través de los ríos Papaloapan, Coatzacoalcos y Pánuco; obras portuarias y aeropuertos modernos.

Desde principios de los años 70's, el crecimiento técnico en la aplicación de la geología para trabajos de ingeniería ha dado un gran paso

hacia adelante; el mayor avance geotecnológico es practicado en México por varios consultores extranjeros y consejeros y por el gran cuerpo de profesionales mexicanos quienes han recibido preparación en los EUA y Europa.

Desafortunadamente, la independencia técnica de México estuvo afectada adversamente en los principios de los años 80's cuando el presupuesto y los fondos para actividades de construcción fueron interrumpidas con la devaluación del peso y la crisis económica asociada. Igualmente, la tecnología importada fue cortada, con la interrupción de la mayoría de los estudiantes becados en países extranjeros.

En los 80's la práctica de la ingeniería geológica nacional estaba principalmente restringida a estudios factibles y a una interrelación con información confiable sobre las características de mecánica de rocas y suelos de un sitio y/o correlación con bancos de investigación geomecánica. Estas investigaciones fueron llevadas fuera de las universidades y laboratorios federales de investigación, así como en compañías privadas de ingeniería geotécnica por todo el país; la venta de sus servicios fue en el extranjero especialmente en países de Centro y Sur América. Algunas

universidades mexicanas ofrecen en esa época maestría en ingeniería (M.I.), Maestría en Ciencias (M.C.) y programas de estudio para Doctorados relacionados a la aplicación de geociencias e ingeniería geológica.

Entre las principales construcciones de ingeniería con aplicaciones y guía de los ingenieros geólogos en México son:

- Torre Latinoamericana
- Torre de PEMEX
- Torre del Hotel de México (World Trade Center)
- El Tren Subterráneo Metro
- La Red Profunda de Túneles del Drenaje

Todos estos trabajos fueron construidos en el área metropolitana, la cual está constituida por arcillas de alta compresibilidad. Muchas grandes presas han sido construidas por todo el país, tal como: Chicoasén en Chiapas, la mayor presa de tierra con 265 m con condiciones favorables del subsuelo y poder de generación de 5,589 Gwh; la planta nuclear de Laguna Verde en el estado de Veracruz. Probablemente hay minas a cielo abierto, minas de carbón subterráneas, otras de cobre y fierro en el norte del país. El túnel de conducción de agua de Tijuana,

excavado en migmatitas utilizando una máquina excavadora de túneles de 3.66 m de diámetro.

Desde 1910 a la mitad de 1984 la CFE y la SRH construyeron aproximadamente 550 presas y canales para riego, plantas de generación, control de avenidas y suministro de agua de todos tipos.

90's. Aún con los problemas económicos se continúan las obras de infraestructura. CFE construye C.H. Zimapán, Hgo y Aguamilpa, Nay. CMA construye la Presa Huixtla, Sin. Se amplía el sistema de tren subterráneo metro y la red profunda del Drenaje

Se privatizan las carreteras, puertos y ferrocarriles.

TABLA PARA LA DETERMINACIÓN MACROSCÓPICA DE LAS ROCAS ÍGNEAS

(Las rocas están ordenadas atendiendo a su ocurrencia natural en el campo, es decir, considerando que las rocas plutónicas se forman a profundidad, mientras que las volcánicas lo son a poca profundidad o sobre la superficie de la Tierra)

| Volcánicas | Acumulaciones de capas o fragmentarias, corriente superficial y restos expelidos | Piroclástica, vítreo | Toba | | Brecha | | Toba-brecha | | | Conglomerado | | |
|--------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|---|---|-----------------------------|--|-----------------------------|---|--|--|---|
| | | | Obsidiana, Perlita, Piedra pez, Pómez | Vidrio alto de sílice | Vidrio bajo de sílice | Taquilita | | | | | | |
| Volcánicas | Corriente superficial o diques de poca profundidad | Porfiroafanítica o afanítica | Pórfido de cuarzo | | Dacita | Línea V-5 | Traquita | Andesita | Basalto | Fonolita | Leucita Nefelinita Basalto nefelinita + olivino Basalto leucita | |
| | | | Riolita | Riodacita Latita | | | | | | | | |
| Plutónicas | Diques de profundos a hipabisales intrusivos secundarios | Porfírica | Pórfido granito | Pórfido monzonita y cuarzo Pórfido monzonita | Pórfido granodiorita | Pórfido tonalita | Pórfido sienita | Pórfido diorita | Pórfido gabro Textura diabásica Diabasa | Pórfido con leucita Pórfido con nefelina | | |
| | | Panidiomórfica, pegmatítica, aplítica | Granito pegmatita Aplita | | Lamprofiro Mineta (Ort.-B.), Vogesita (Ort.-H.) | | Kersantita (Plag.-B.) Malchita (Plag.-H.) | | P-3 a P-4 | | | |
| Intrusivos grandes | Granular | | Granito | Monzonita de cuarzo Monzonita | Granodiorita | Tonalita | Sienita | Diorita | Gabro Gabro con olivino Anortosita | Sienita nefelina | Ijolita Missourita + Olivino | Hornblenda piroxenita dunita Serpentinita peridotita |
| Ocurrencia ordinaria | Textura ordinaria | | | | | P-1 | P-2 | | | | | |
| Composición mineralógica | Característica | | M.B.H.* | B.H.P. | B.H.P. | B.H.P. | B.H.P. | B.H.P. | B.H.P. | B.H.P. | Ortoclasa | Piroxenos alcalinos |
| | Esencial | | Cuarzo: presente | | | Cuarzo: ausente | | | | | | |
| | | | Ort. > Plag. | Ort. = Plag. | Plag. > Ort. | Principalmente plag. sódica | Principalmente ort. | Principalmente plag. sódica | Principalmente plag. cálcica | Feldspatoídes: leucita, nefelina, cancrinita, etc. | Minerales máficos solamente B.H.O.P. | |
| Tipo de roca | | | Silíceas | | | | Intermedias | | Máficas | Alcalinas | | Ultra-máficas |

* Abreviaturas: M—muscovita, B—biotita, H—hornblenda, O—olivino, Ort.—ortoclasa, Plag.—plagioclasa, P—piroxeno.

CUADRO 1-3. CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS ÍGNEAS

| Profundidad de formación —textura—estructura | Coloración clara | | Coloración oscura | | |
|---|--|---|--|---|--|
| | + Cuarzo | — Cuarzo | + Cuarzo | — Cuarzo | |
| Grano grueso, medio, fino (textura granítica) (Constituidas a profundidades considerables* en diques de profundo asiento, batolitos, chimeneas y lacolitos.) | Granito + O.H. Granodiorita + P.M. Granito porfiroide Pegmatita Monzonita cuarcífera P.O.B.H | Monzonita P.O.B.H (Aplita monzonítica, pegmatita monzonítica) | Cuarzo diorita o dioritacuarcífera, P.B.H. ± X | Diorita P,B,H, ± X Gabro P, ± X, ± H Peridotita ± P, ± X, + X | |
| Grano medio a fino (constituidas a profundidades moderadas** en diques y lechos.) | Granito porfiroide | Monzonita porfiroide | | Diorita porfiroide Diorita aplitica Dolerita (diabasa) + X, P. algo de B. y augita | |
| Grano muy fino a vítreo, a veces esponjoso vítreo o vesicular (constituidas en expansiones superficiales, diques, tapones, depósitos de cenizas)*** | Compacta | Felsitas (víticas) | | Obsidiana (vítrea) | Andésita + P (felsita vítrea) Basalto (vesicular) ± P.X |
| | | Riolita + O.B.H | Traquita | | |
| | Brecha volcánica | | | | |
| Esponjosa a suelta | Pómez, ceniza volcánica, tóba volcánica | | | | |



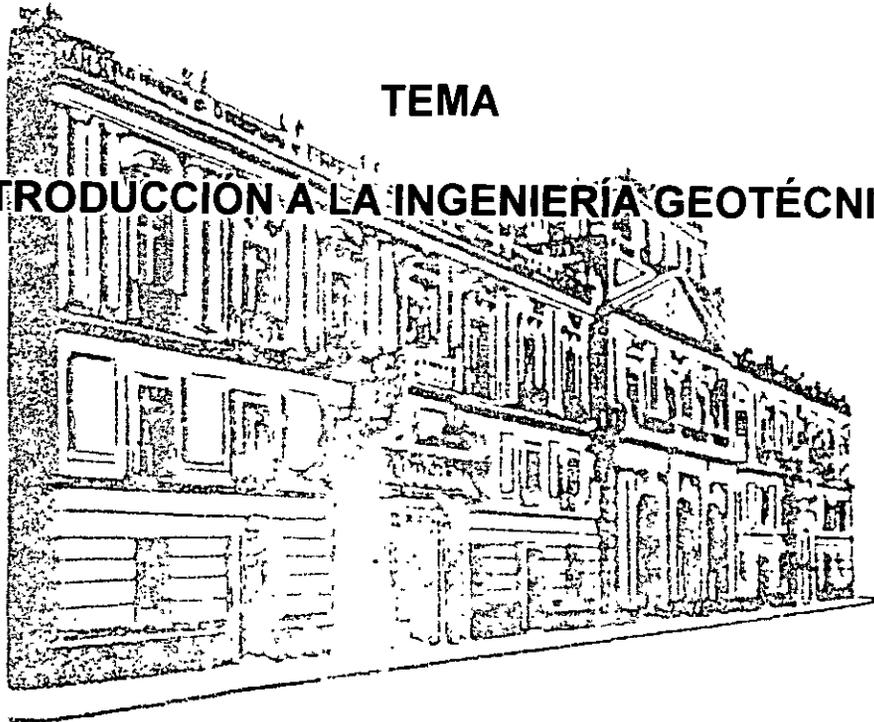
**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS I

TEMA

INTRODUCCION A LA INGENIERIA GEOTÉCNICA



**CONFERENCISTA
DR. GABRIEL AUVINET G.
PALACIO DE MINERÍA
MAYO 2000**

INTRODUCCION A LA INGENIERIA GEOTECNICA.

(Traducción de parte del Capítulo 1, del libro "An Introduction to Geotechnical Engineering", de los autores Robert D. Holtz y William D. Kovacs)

1.1 INGENIERIA GEOTECNICA.

La *Ingeniería Geotécnica*, como su nombre lo indica, se refiere a la aplicación de la tecnología de la Ingeniería Civil al manejo de los materiales térreos de la corteza del planeta. Usualmente, el ingeniero geotécnico se ocupa de estudiar sólo los materiales naturales que se encuentran en o cerca de la superficie de la tierra. Los ingenieros civiles denominan a estos materiales térreos como *suelo* y *roca*. El *suelo*, en el sentido ingenieril, es un aglomerado de minerales, materia orgánica y sedimentos, relativamente sin cohesión depositado sobre el lecho de roca. Los suelos se pueden romper o disgregar fácilmente, debido a sus constituyentes minerales o partículas orgánicas. Las rocas por el contrario, tienen alta resistencia debido a cohesión interna y fuerzas moleculares, que mantienen unidos a sus granos minerales constituyentes. Esto es cierto, tanto si la roca constituye una estructura masiva firme, como aquella que forma una partícula de grava embebida en un suelo arcilloso.

La frontera que divide a los suelos de las rocas es arbitraria, y muchos materiales naturales que puede uno encontrar en la práctica profesional no son fácilmente clasificables. En ocasiones, se llega a hablar de "rocas muy blandas" o de "suelos muy duros". Otras disciplinas científicas e ingenieriles tienen diferentes criterios para definir la diferencia entre suelos y rocas. En geología, por ejemplo, se entiende como roca a todos los materiales apoyados en la corteza de la tierra, independientemente de cuantas partículas minerales están reunidas por diversas ligas. Los suelos para los geólogos son precisamente rocas descompuestas y desintegradas generalmente apoyadas en la parte superficial más delgada de la corteza y capaz de sustentar la vida superficial. En forma similar, la pedología (ciencia del suelo) y la agronomía coinciden en estudiar las capas más superficiales del suelo, es decir, aquellos materiales de interés en actividades agrícolas y forestales.

Los ingenieros geotécnicos pueden aprender mucho, tanto de la geología como de la pedología. Ambas ciencias, especialmente la ingeniería geológica, son auxiliares importantes para el ingeniero geotécnico y existe un considerable traslape entre estos campos. Sin embargo, las diferencias de terminología, aproximación al sujeto de estudio y objetivos, puede causar alguna confusión, especialmente para los principiantes.

La ingeniería geotécnica tiene diversos aspectos o énfasis. La *mecánica de suelos* es la rama de la ingeniería geotécnica que se ocupa de la ingeniería mecánica y las propiedades de los suelos, mientras que la *mecánica de rocas* se ocupa de la ingeniería mecánica y las propiedades de las rocas, usualmente pero no necesariamente del lecho rocoso. La mecánica de suelos aplica los principios básicos de la mecánica, que incluye cinemática, dinámica, mecánica de fluidos y mecánica de materiales a los suelos. En otras palabras, el suelo, preferentemente al agua, el acero, o el concreto, por ejemplo, ahora la ingeniería de materiales llega a ser aquello cuyas propiedades y comportamiento debemos comprender, con el fin de construir cosas con ésta. Se puede hacer un comentario similar respecto a mecánica de rocas. Finalmente, se debe hacer notar que

existen diferencias significativas entre el comportamiento de las masas de suelo y las masas de roca, y en principio no hay mucho traslapé entre ambas disciplinas.

La *ingeniería de cimentaciones* aplica los conocimientos de la geología, mecánica de suelos, mecánica de rocas, e ingeniería estructural, para posibilitar el diseño y la construcción de cimentaciones en obras de ingeniería civil y otro tipo de estructuras. La ingeniería de cimentaciones debe ser capaz de predecir el comportamiento o la respuesta del suelo o roca donde se cimienta, debido a las cargas que impone la estructura. Algunos ejemplos del tipo de problemas que encara la ingeniería de cimentaciones, incluye el diseño de las cimentaciones para industrias, comercios, edificios residenciales, y otros tipos como estructuras de apoyo para torres de radar; así como las cimentaciones para instalaciones petroleras como en el caso de tanques y estructuras fuera de costa. Los barcos deben contar con un dique seco durante la construcción o para fines de reparación, de modo que dicho dique debe contar con una cimentación. El apoyo de los cohetes y las estructuras pertinentes durante su construcción y lanzamiento conducen a problemas muy interesantes y desafiantes. Los problemas a que se enfrenta la ingeniería geotécnica en lo que se ha comentado, incluye la estabilidad de taludes naturales y excavados, la estabilidad de las estructuras de retención permanentes o temporales, los problemas de construcción, el control del movimiento y las presiones del agua, así como el mantenimiento y rehabilitación de viejos edificios. La cimentación no solo debe resistir con seguridad las cargas estáticas de la construcción y estructuras, sino que debe resistir también en forma adecuada las cargas dinámicas debidas a vientos, sismos, etc.

Si usted piensa acerca de esto, llegará a la conclusión de que es imposible diseñar o construir cualquier estructura de ingeniería civil, sin considerar finalmente la cimentación en suelos y en rocas con alguna extensión; y esta es una verdad, tanto si la estructura se construye en la tierra o si se hace en un ambiente extraterrestre. El desempeño, la economía, y la seguridad de

cualquier estructura de ingeniería civil, finalmente estará afectada o se puede controlar en función de su cimentación.

Los materiales térreos se utilizan frecuentemente como materiales de construcción, debido a que son los materiales de construcción más baratos posibles. Sin embargo, sus propiedades ingenieriles como pueden ser resistencia y compresibilidad en condiciones naturales son frecuentemente malas. En muchas ocasiones se deben tomar medidas para densificar, aumentar la resistencia, o por otra parte estabilizar y armar a los suelos, de modo que se desempeñen satisfactoriamente en condiciones de servicio.

Los terraplenes para carreteras y vías férreas, los campos de aviación, las presas de tierra y enrocamiento, los diques, y los acueductos, son ejemplos de estructuras de tierra (materiales térreos); y el ingeniero geotécnico es el responsable de su diseño y construcción. La seguridad de las presas y la rehabilitación de presas viejas son aspectos importantes de esta área de la ingeniería geotécnica. Igualmente emparentado, especialmente para ingenieros en carreteras y campos de aviación, está el diseño del pavimento, el cual es la última capa superficial de la estructura de tierra. En este caso final, el traslape entre las ingenierías de transporte y geotécnica es más bien aparente.

La ingeniería de rocas, análoga para las rocas a lo que es la ingeniería de cimentaciones para los suelos, se encarga del estudio de las rocas como cimentación y como material de construcción. Debido a que la superficie de la tierra está en su mayor parte cubierta por suelo o agua, la ingeniería de rocas usualmente se aplica a obras bajo la superficie (túneles, casas de máquinas subterráneas, cavidades para depósitos de petróleo, minas, etc.). Sin embargo, algunas veces la ingeniería de rocas se aplica en obras superficiales, como es el caso de la construcción y cimentación de presas apoyadas en el lecho rocoso, excavaciones profundas en el lecho rocoso, la estabilidad de taludes de roca, etc.

Esta presentación pretende mostrar los problemas típicos a los que

se enfrenta el ingeniero geotécnico, que como se puede ver, primeramente, se trata de un campo muy amplio, y en segundo lugar, lo importante que resulta para el correcto diseño y construcción de estructuras en ingeniería civil. En verdad, se puede decir que la ingeniería geotécnica combina las ciencias físicas básicas, la geología y la pedología, con las ingenierías hidráulica, estructural, de transporte, de construcción y de minas.

1.2 LA NATURALEZA UNICA DE LOS SUELOS Y LAS ROCAS COMO MATERIALES.

La ingeniería geotécnica es altamente empírica, y es quizá más cercana a un "arte" que las otras disciplinas que forman la ingeniería civil. Lo anterior se debe básicamente a que los suelos y rocas son materiales naturales. Frecuentemente se encuentran en estos materiales altas variaciones, entre puntos que pueden tener separaciones de hasta unos cuantos milímetros. Otra forma de expresar esto, es que los suelos son materiales *heterogéneos* antes que *homogéneos*. Es decir, que el material o las propiedades ingenieriles pueden variar ampliamente de un punto a otro en el interior de una masa de suelo. Además, los suelos en general son materiales *no lineales*, es decir, las relaciones entre esfuerzos y deformaciones no son una línea recta. También, para complicar más las cosas, los suelos son materiales *no conservativos*; esto quiere decir que tienen una memoria fantástica (recuerdan casi todo aquello que les ha sucedido, y este hecho afecta fuertemente su comportamiento ingenieril). En lugar de ser *isotrópicos*, los suelos son típicamente *anisotrópicos*, lo que quiere decir que sus propiedades materiales o ingenieriles no son las mismas en direcciones diferentes.

Muchas de las teorías de que disponemos para modelar el comportamiento mecánico de los materiales que se usan en ingeniería, suponen que los materiales son homogéneos e isotrópicos; y que además obedecen a leyes esfuerzo-deformación lineales. Los materiales de ingeniería comunes, como el acero y el concreto, no se desvían en forma significativa de esos ideales, por lo que se pueden

usar teorías lineales simples, con discreción, para predecir su respuesta para cargas de ingeniería. Con los suelos y las rocas no somos tan afortunados. Como podrá usted ver en sus estudios de ingeniería geotécnica, debemos suponer en muchos casos una respuesta esfuerzo-deformación lineal, pero para calcular adecuadamente se deben aplicar grandes correcciones empíricas o factores de "seguridad" a nuestros diseños, para calcular el comportamiento real del material.

Por otra parte, el comportamiento mecánico de los suelos y las rocas "in situ", está frecuentemente gobernado o controlado por juntas, fracturas, estratos y zonas débiles, y otros "defectos" en el material. Esta razón impide modelar exitosamente estos materiales en el laboratorio. Es por esto que la ingeniería geotécnica es realmente un "arte", antes que una ciencia de la ingeniería. El éxito de la ingeniería geotécnica depende del buen juicio y la experiencia del diseñador, constructor, o consultor. Por otra parte, el éxito del ingeniero geotécnico consiste en desarrollar un "tacto" sobre el comportamiento de los suelos y las rocas, para más adelante poder diseñar una cimentación en forma segura y económica, o construir con seguridad una estructura de ingeniería.

Ahora bien, una construcción de ingeniería consta de:

SUPERESTRUCTURA

SUBESTRUCTURA

Para proyectar o construir la SUPERESTRUCTURA es necesario:

- a. conocer las propiedades de los materiales que se emplearán
- b. conocer la calidad de los materiales del basamento en donde se proyecta construir una superestructura como son las propiedades de las rocas y suelos que lo constituyen

La SUBESTRUCTURA (cimiento) transmite el peso de la estructura y de las cargas superimpuestas al BASAMENTO, en este caso resulta más exacta su designación como MATERIAL DE BASAMENTO. También se emplea el término <<CIMIENTO>> para la subestructura o parte más baja de la misma. Se aplica el vocablo <<FUNDACION>> para aquellas partes de la subestructura que están en contacto directo con el material del basamento subyacente.

Estos conocimientos tienen importancia relevante cuando la totalidad de la estructura ingenieril ha de construirse con materiales naturales, como ocurre con las presas de tierra.

El conocimiento de las propiedades básicas de las rocas y minerales que constituyen la corteza terrestre es un requisito previo de los estudios geotécnicos.

Los GEOLOGOS aplican el término <<ROCA>> a todos los elementos constitutivos de la corteza terrestre.

Para el GEOTECNISTA y para los INGENIEROS las <<ROCAS>> son los materiales más duros y compactos.

Y los <<SUELOS>> los materiales de ellos derivados.

Definiciones

GEOTECNIA

1. Es el conjunto de disciplinas cuya finalidad es la construcción de obras civiles

Estas disciplinas son:

GEOTECNIA $\begin{cases} \text{GEOLOGIA APLICADA A LA INGENIERIA CIVIL} \\ \text{MECANICA DE SUELOS} \\ \text{MECANICA DE ROCAS} \end{cases}$

2. Es el estudio del comportamiento recíproco del terreno y de las estructuras establecidas en él

GEOLOGIA APLICADA A LA CONSTRUCCION

1. Es la ciencia que proporciona la información necesaria para comprender el futuro comportamiento mecánico de un macizo rocoso o de un suelo (p.e.- estudiando las discontinuidades). Es el punto de partida para iniciar cualquier investigación geotécnica, siendo primordialmente para la ubicación del sitio donde ha de construirse una obra civil

MECANICA DE SUELOS

1. La mecánica de suelos es la aplicación de las leyes de la Mecánica y la Hidráulica a los problemas de ingeniería que tratan con sedimentos y otras acumulaciones no consolidadas de partículas sólidas, producidas por la desintegración mecánica o descomposición química de las rocas independientemente de que tengan o no contenido de materia orgánica

Dr. Ing. Karl Terzaghi (Theoretical Soil Mechanics)

MECANICA DE ROCAS

1. Es la ciencia que estudia el comportamiento mecánico de las masas rocosas que se encuentran bajo la acción de fuerzas producidas por fenómenos naturales (vulcanismo, tectonismo, aguas subterráneas), o artificiales impuestas por el hombre (cimentaciones, excavaciones, voladuras)
2. Es la ciencia teórica y aplicada que trata del comportamiento mecánico de las rocas; es la rama de la Mecánica que estudia la reacción de las rocas a los campos de fuerzas de su entorno físico

Comite de Mecánica de Rocas.
Academia Nacional de Ciencias, Washington, D.C., 1966



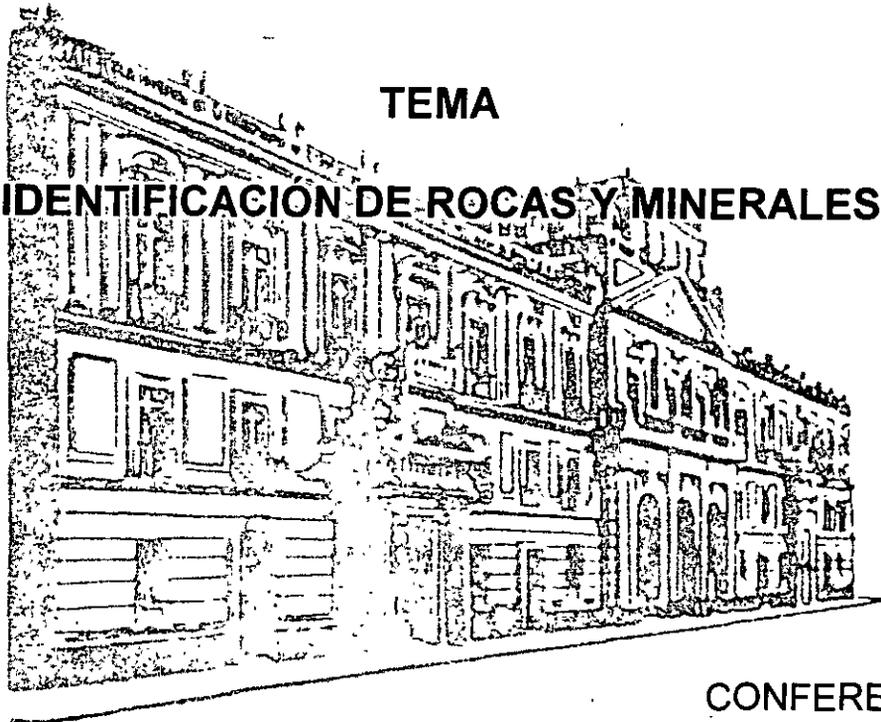
**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS I

TEMA

IDENTIFICACIÓN DE ROCAS Y MINERALES



**CONFERENCISTA
DR. GABRIEL AUVINET G.
PALACIO DE MINERÍA
MAYO 2000**

IDENTIFICACION DE ROCAS Y MINERALES

(Traducción del Apéndice 3 del libro "Introduction to Rock Mechanics" de Richard E. Goodman,

¿CUANTAS ROCAS Y MINERALES DEBE CONOCER UN INGENIERO?

Los libros de texto de mineralogía comúnmente enlistan propiedades determinantes para cerca de 2000 minerales. Un buen libro de petrografía mencionará más de 1000 tipos de rocas. El tema es interesante y tiene muchas repercusiones prácticas. Afortunadamente, sin embargo, la lista de los minerales formadores de rocas más comunes es más bien corta (alrededor de 16) y muchos tipos de rocas caen naturalmente dentro de grupos con atributos ingenieriles similares, de suerte que solamente cerca de 40 nombres de rocas serán suficientes para describir a la mayoría de las de real interés para los fines de la ingeniería civil. Hay casos excepcionales, como puede ser, cuando quizá tipos de rocas raras causen inusuales problemas en excavaciones o como materiales rocosos. Es posible aprender 1000 variedades con el fin de estar equipado para un caso

especial, aunque es más eficiente conseguir el auxilio de un petrólogo cuando suceda esto. Para la educación básica del ingeniero geotecnista, usualmente será suficiente familiarizarse con los 16 minerales y las 40 rocas antes comentados, esto es, debe ser capaz de identificarlas y distinguir algunas de sus particularidades y propiedades.

MINERALES FORMADORES DE ROCAS.

Los minerales más comunes formadores de rocas son los silicatos, carbonatos, y diversas sales (sulfatos y cloruros). Los silicatos se forman a partir de tetraedros de silicio-oxígeno (SiO_4) mutuamente eslabonados en "estructuras en isla", láminas, cadenas, y redes por presencia de hierro, magnesio, calcio, potasio y otros iones. Las estructuras en isla, tales como el olivino, son tetraedros sin esquinas cortadas (estos son los minerales de la más alta temperatura del grupo de los silicatos -tempranamente formados en disolución por enfriamiento- y son generalmente los primeros en intemperizarse cuando se exponen a la atmósfera). Las estructuras laminadas (p. ej. mica) se rompen fácilmente (debido a su clivaje o crucero) en una dirección y generalmente presentan baja resistencia al corte a lo largo de esa dirección (paralela a las láminas). Las cadenas (p. ej. los piroxenos y los anfíboles) y redes ligadas a los feldespatos y el cuarzo, son usualmente muy resistentes y durables.

Los carbonatos son soluciones débilmente solubles en agua, pero mucho más solubles si el agua se ha enriquecido con ácido por infiltración a través del suelo o por contaminación industrial. Los carbonatos también tienen la característica de fácil torsión por deslizamiento sobre los planos intracristalinos, tales rocas compuestas por esos minerales se comportan plásticamente a elevadas presiones. Otras sales (p. ej. yeso y halita) son fácilmente solubles en agua. La pirita está presente en pequeñas cantidades en casi todas las rocas y ocasionalmente se presenta como un porcentaje significativo de las rocas.

Los minerales formadores de rocas que usted debe ser capaz de identificar son:

Silicatos

Cuarzo, feldespato (ortoclasa y plagioclasa), mica (biotita y moscovita), clorita, anfíbol, piroxeno y olivino.

Carbonatos

Calcita y dolomita.

Otros

Yeso, anhidrita, halita, pirita y grafito.

La Tabla A3.1 le ayudará a identificar esos minerales. Ya que los minerales que forman la textura de la roca están usualmente incrustados en fragmentos o cristales de menos de un centímetro como dimensión máxima, resulta necesario observar a la roca usando una lupa, o mucho mejor, con un microscopio binocular. Los minerales se pueden dividir de esta forma, en aquellos que se pueden rayar con la uña, aquellos que se pueden rayar con una navaja pero no con la uña, y aquellos que no se pueden rayar con una navaja. En la escala de Moh's de dureza relativa, la uña tendrá usualmente una dureza entre 2 y 2.5, al tiempo que el promedio de la navaja tendrá una dureza entre 5 y 5.5. La presencia o ausencia de clivaje (crucero) es uno de los rasgos de diagnóstico que más fácilmente se puede notar en los minerales que se listan. Las superficies de clivaje son pulidas y uniformes, y reflejan la luz incidente uniformemente en una dirección. Los ángulos entre los clivajes se pueden medir girando el espécimen con la mano, para moverse desde la orientación de una reflexión sobre una superficie hasta la orientación de reflexión para la superficie adyacente. Como una ilustración de como trabaja la tabla, compare la calcita, el feldespato y el cuarzo, los cuales son tres minerales que los ingenieros frecuentemente confunden. El cuarzo no presenta clivaje y no se puede rayar con una navaja (puede mostrar fases cristalinas; las fases cristalinas se pueden destruir cuando se rompe el cristal, ya que las superficies de clivaje serán reconocibles en todos los trozos minerales después de romper el

cristal). El feldespato es más duro que la navaja y también presenta dos buenas direcciones de clivaje. La calcita también tiene buen clivaje pero se puede rayar. Además, la calcita presenta ángulos romboédricos entre las superficies de clivaje (75° y 105°) mientras que los clivajes del feldespato tienen aproximadamente ángulos de 90° entre ellos.

OTROS MINERALES DE IMPORTANCIA.

Un pequeño número de minerales explican muchos de los problemas especiales que algunas veces se presentan con las rocas. Esos problemas especiales tienen que ver con la contaminación, el intemperismo rápido, la expansión, el ataque químico de rocas vecinas, el comportamiento indeseable en el concreto, y la muy baja fricción. Algunos de los minerales involucrados son difíciles de identificar en pequeños especímenes, pero el ingeniero debe ser capaz de reconocer los nombres y valorarlos en los reportes geológicos. Los geólogos académicos no siempre están enterados de la influencia de algunas de esas particularidades, las cuales pueden influir sobre las propiedades ingenieriles y en el comportamiento de las rocas. A continuación se muestra una lista parcial de minerales potencialmente problemáticos.

Minerales solubles

Calcita, dolomita, yeso, anhidrita, sal (halita) y ceolita.

Minerales inestables

Marcasita y pirrotina.

Minerales potencialmente inestables

Nontronita (montmorillonita rica en hierro), nefelina, leucita, micas ricas en hierro.

Minerales cuyo intemperismo desprende ácido sulfúrico

Pirita, pirrotina, y otros sulfuros (minerales en mena)

Minerales con bajos coeficientes de fricción

Arcillas (especialmente montmorillonitas), talco, clorita, serpentinita, micas, grafito y molibdenita.

Minerales potencialmente expansivos

Montmorillonitas, anhidrita y vermiculita.

Minerales que reaccionan o interfieren con el cemento portland

Opalo, vidrio volcánico, algunos horstenos, yeso, ceolita y mica

IDENTIFICACION DE ROCAS COMUNES.

Uno no debe esperar ser capaz de asignarle nombre geológico correcto a todos los especímenes muestreados para un proyecto de ingeniería; algunas veces no solo se requiere un entrenamiento cabal en petrología, sino también un examen petrográfico de una lámina delgada con el fin de determinar el tipo de roca de que se trata. Sin embargo, hay un sistema para identificación de rocas y la mayoría de los ingenieros lo puede utilizar para volverse razonablemente hábil para clasificar rocas con una pequeña guía. Se debe apreciar que la clasificación geológica de rocas no promete agrupar a las rocas de acuerdo con las propiedades ingenieriles; de hecho, la primera propuesta consiste en agrupar a las rocas en función de su origen. Sin embargo, el nombre de una roca con una pequeña descripción de la naturaleza y arreglo de las partículas que la componen o cristales, frecuentemente aporta una mejor connotación de valor práctico.

La Tabla A3.2 presenta un diagrama de flujo muy simplificado que le ayudará a asignar un nombre a un espécimen desconocido. En muchos casos al usar esta carta, el nombre de un grupo de rocas se puede asignar sin ambigüedades después del examen de una superficie fresca (no intemperizada) o de un espécimen manejable que se desconozca. Como quiera que sea, la carta no es infalible a causa de las

fronteras entre diferentes grados, los cuales algunas veces se basan en juicios subjetivos, y las cualidades se fijan frecuentemente con diferentes grados comparando entre una muestra y la siguiente. De los muchos atributos que puede presentar un espécimen de roca, solo tres se eligieron predominantemente en esta carta: textura, dureza y estructura.

La mayor división se tiene entre las texturas *crystalina* y *clástica*. Las rocas cristalinas como son el granito, el basalto y el mármol poseen una textura entrelazada de cristales con espacios porosos muy pequeños o inexistentes. Pueden haber fronteras definidas por granos rotos y otras fisuras que pueden debilitar a la roca, y los cristales por sí mismos pueden ser deformables (p. ej. la calcita en el mármol) pero la matriz es generalmente de buena dureza. En contraste, las rocas clásticas consisten en una colección de partículas de minerales y rocas con espacios porosos semiesféricos más o menos conectados continuamente a través de la roca. A la extensión con que estos espacios porosos estén rellenos de un cementante durable, la roca será resistente y rígida. Algunas rocas clásticas que son duras y de apariencia rocosa contienen solo arcilla en los espacios entre partículas y se ablandan hasta la consistencia de un suelo al humedecerlas con agua. Algunos especímenes de rocas tienen una granulación tan fina que los granos o cristales no se pueden apreciar con una lupa; en este caso la roca se debe clasificar con otras pruebas.

El segundo índice de clasificación que se usa en la Tabla A3.2 es la dureza. Sin embargo, esta propiedad está menos definida como propiedad de una roca que como propiedad de un mineral. La dureza al rayado de una superficie de roca fresca aporta un índice útil. Por "fresco" se debe entender el no utilizar especímenes ablandados por intemperismo o con procesos de alteración localizados. Algunas rocas (p. ej. pizarras cloritosas, también llamadas rocas verdes) deben sus características a alteración hidrotermal, la cual ocurre a considerable profundidad, alterando un gran volumen de roca; esto no debe ser razón para excluir esas rocas como candidatas para fines de identificación, sino más bien para excluir aquellos especímenes

intemperizados que cuentan con sondeos vecinos. El rayado de dureza de una roca no es un índice infalible, como sucede en algunas rocas que muestran diferentes niveles de dureza al rayado de una navaja y en algunas ocasiones se muestran estos límites con una "banda de dispersión" de variabilidad. No obstante, en ciertos casos la prueba de rayado se utiliza, por ejemplo, para distinguir la aplita del mármol, o la hornfelita de la argilita (también llamada arcillolita). En rocas micáceas, que se revelan como arañadas, bajo el microscopio, que de hecho están compuestas de laminillas fuera de los fragmentos de clivaje comparándolas con la hoja de la navaja, como en una acción de arado. El rayado de dureza usualmente no se utiliza como un índice de clasificación en las rocas clásticas cuarzosas.

Se hace una tercera división entre estructuras isotrópicas y anisotrópicas. Las rocas metamórficas (p. ej. pizarra, esquisto, y gneis), poseen una tendencia incipiente a partirse paralelas a un plano o un eje; consecuentemente, esas rocas presentan anisotropía extrema (direccionalidad) en todas sus propiedades físicas. Algunas rocas sedimentarias (p. ej. lutita, pedernal, y caliza fuertemente recostada), poseen semejantes laminaciones con espaciamientos cerrados, que por su misma uniformidad hacen que las muestras presenten una fuerte direccionalidad. En otras rocas, la estructura es masiva para la escala de una muestra manejable (p. ej. arenisca marcadamente recostada, caliza, y basalto) de modo que el espécimen aparece como si fuera isotrópico. Algunos granitos son isotrópicos en forma uniforme analizados en la escala de campo. En rocas clásticas cuarzosas, no obstante esto es importante como un atributo físico, el grado de isotropía no se utiliza como un índice de clasificación. La clasificación de esas rocas se efectúa principalmente con base en el tamaño de los granos y de la textura.

Algunos grupos de rocas particulares no se considerarán. Las rocas cristalinas isotrópicas de gran dureza, se presentan en tres formas dependiendo de los tamaños relativos de los cristales: las variedades de grano grueso son plutónicas de origen ígneo; aquellas con suficientes cristales gruesos en una matriz de tamaños de

crystal invisibles al observarlos con una lupa (textura porfirítica) son de origen *volcánico*; las rocas que presentan en forma uniforme un grano fino, o porfirítico con un grano fino en la masa de fondo, tienen como origen usualmente el de un *dique*, habiéndose enfriado cerca de la superficie o a una profundidad moderada. Los nombres de la mayoría de esas rocas dentro de esos grupos, reflejan cambios en la composición mineralógica que no siempre son significativos desde el punto de vista de la ingeniería. Por ejemplo, la diferencia entre un *granito* y una *granodiorita* se encuentra principalmente en la abundancia relativa de los minerales de ortoclasa y plagioclasa, los cuales son casi idénticos en propiedades físicas. Las variedades oscuras de esas rocas, tales como el *gabro* y la *peridotita*, están compuestas de proporciones relativamente grandes de piroxeno y olivino formados tempranamente a una temperatura alta, los cuales se convierten en los más susceptibles a procesos de intemperismo. Las rocas cristalinas duras y anisotrópicas son usualmente un poco más resistentes (p.ej. *gneis* y *anfíbolita*). Las rocas cristalinas blandas y anisotrópicas donde quedan incluidos los esquistos, en las cuales la suavidad se puede deber a una verdadera incrustación de *clorita* u otros minerales blandos, o un surcado de micas como previamente se hizo notar.

Las rocas cristalinas isotrópicas que se rayan fácilmente engloban a las rocas evaporitas (*caliza*, *dolomita*, *yeso*, *anhidrita*, *sal de roca*, etc.) y rocas básicas ígneas alteradas (*serpentinita* y *pizarra cloritosa*). Todas esas rocas pueden presentar unas propiedades indeseables de debilidad (baja resistencia) y deformabilidad para el ingeniero civil, las *serpentinitas* en virtud de superficies internas por rotura previa y minerales débiles asociados, y los *esquistos* en virtud de las bandas continuas de mica, *clorita* u otros minerales de baja resistencia al corte.

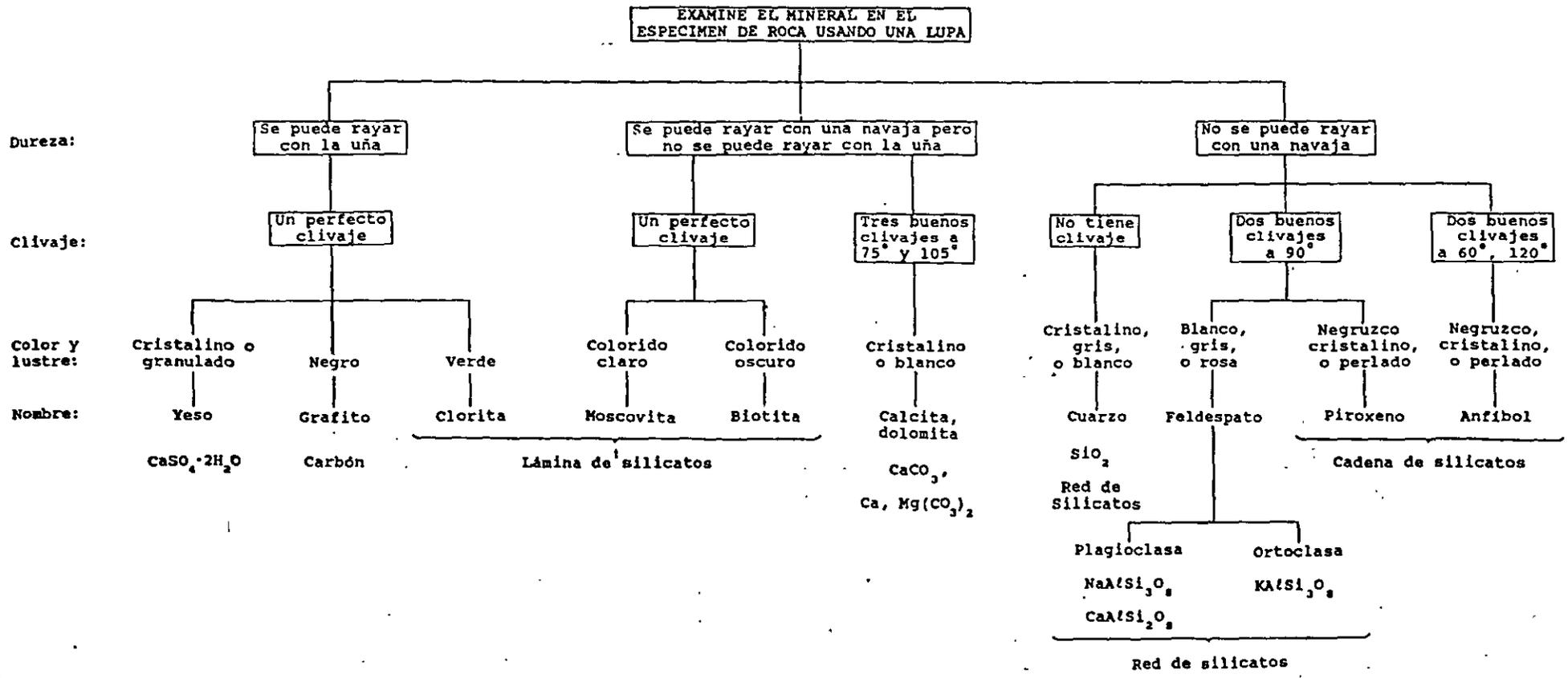
Las rocas más difíciles de identificar son aquellas sin granos visibles o cristales. Esto se presenta en los *basaltos aeníticos*, *pedernales*, *lutitas*, algunas *pizarras*, y algunas *calizas* de grano fino y *dolomitas* que pueden presentar dificultades cuando se examina la dureza y la estructura. Las estructuras y rocas asociadas que se

pueden estudiar en el campo, usualmente facilitan mucho la identificación de las rocas.

La Tabla A3.3 presenta los periodos geológicos. En la ingeniería práctica, se recomienda que los nombres de las eras y los periodos se incluyan con el nombre petrológico de la roca, particularmente en lo referente a rocas sedimentarias. En forma general, las rocas más viejas tienden a ser más duras y con una cementación más permanente. Hay, desafortunadamente, importantes y dramáticas excepciones; por ejemplo, arcillas montmorilloníticas no cementadas que se asientan en unidades de roca desde el Paleozoico inferior. Aquellos versados en ingeniería geológica, son de la opinión que los nombres de las eras y periodos en que se forman las rocas se asocian implícitamente a atributos ingenieriles en forma más efectiva que hacerlo con cualquier otra propiedad índice aislada. Muchos trabajadores de Mecánica de Rocas deben entender la utilidad de esos nombres y emplearlos rutinariamente en la descripción de rocas.

TABLA A 3.1

DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO DE IDENTIFICACIÓN DE MINERALES:
MINERALES FORMADORES DE ROCAS MÁS COMUNES



T A B L A A3.2 (continuación 1)

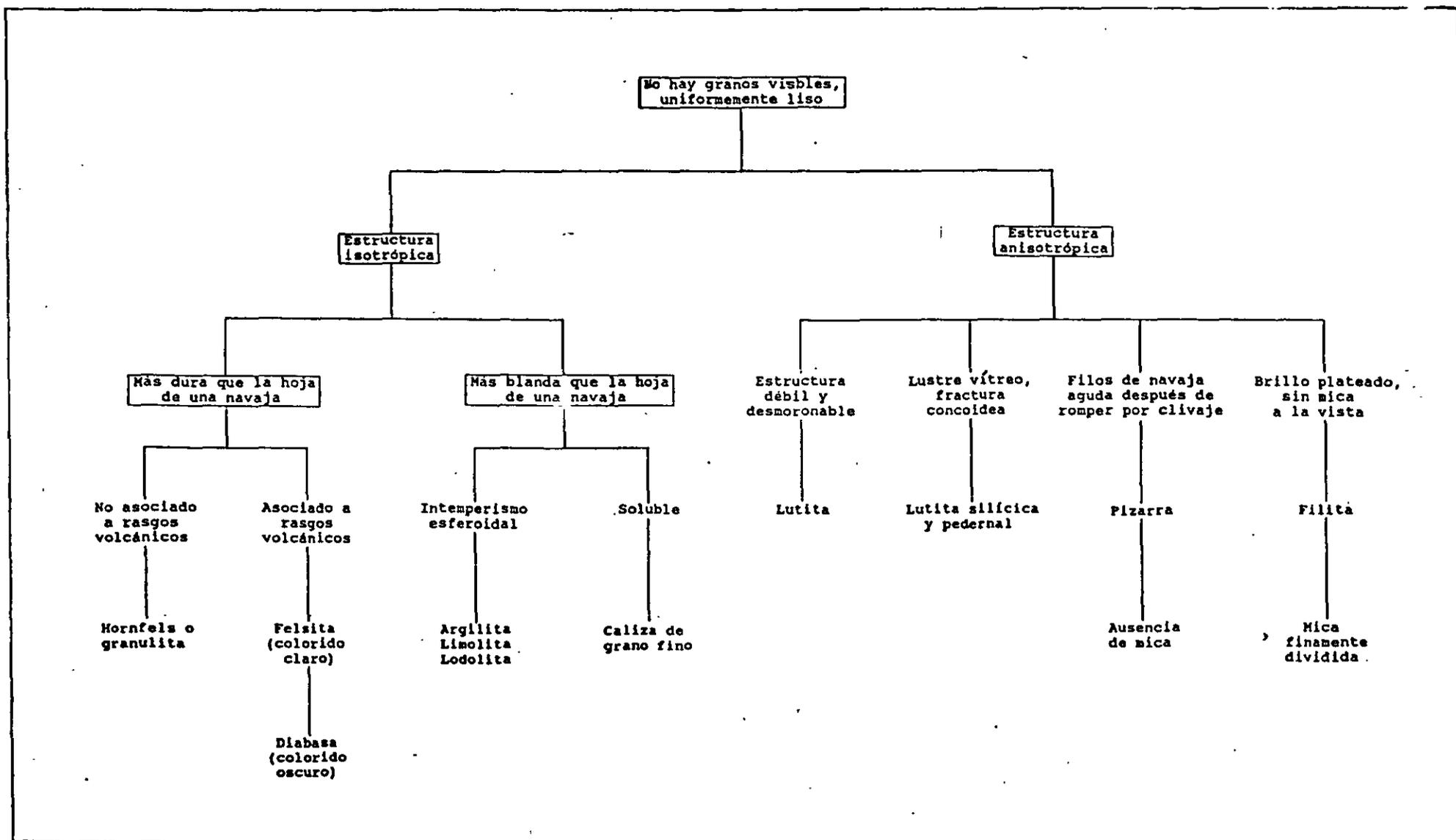
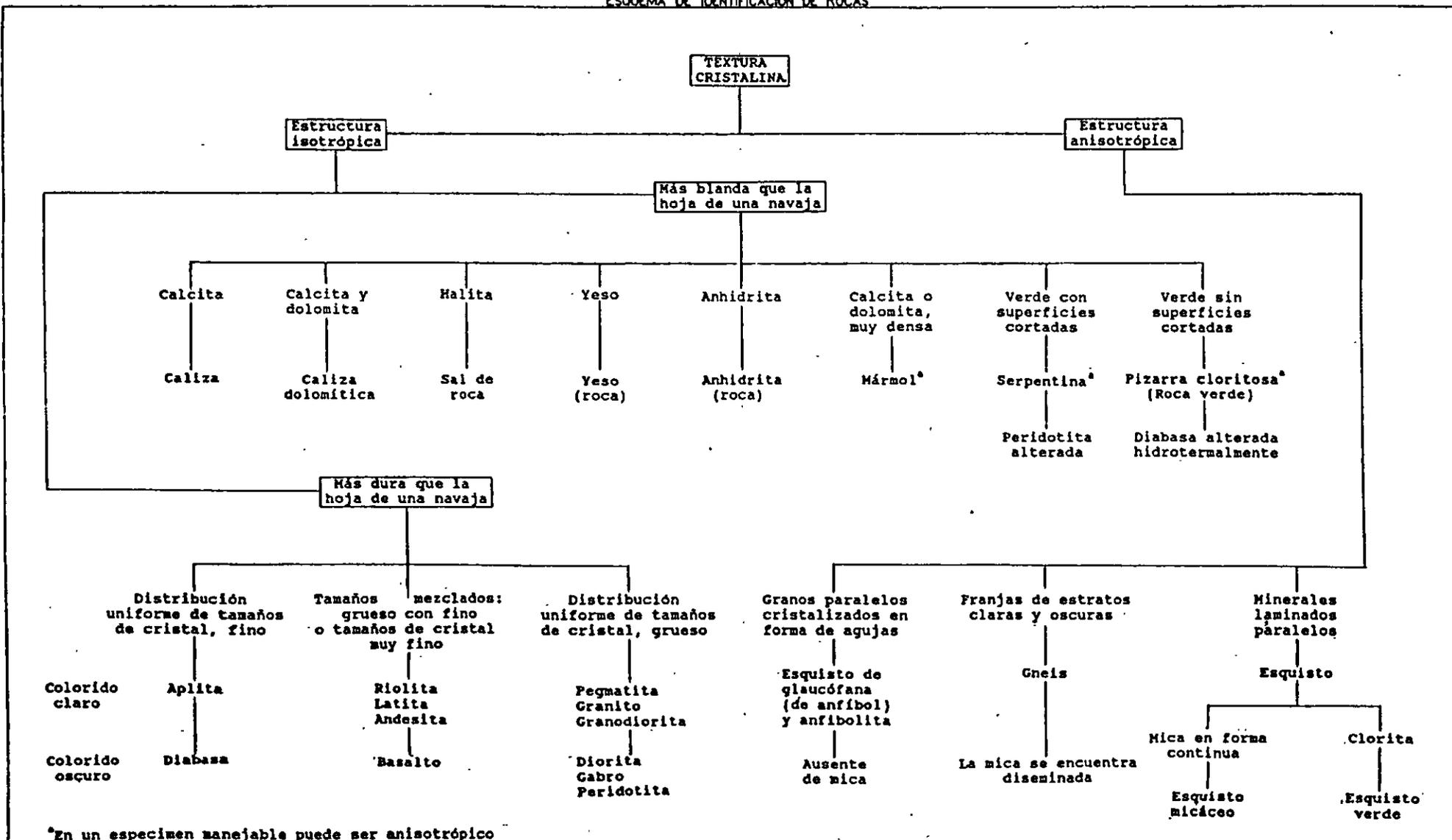
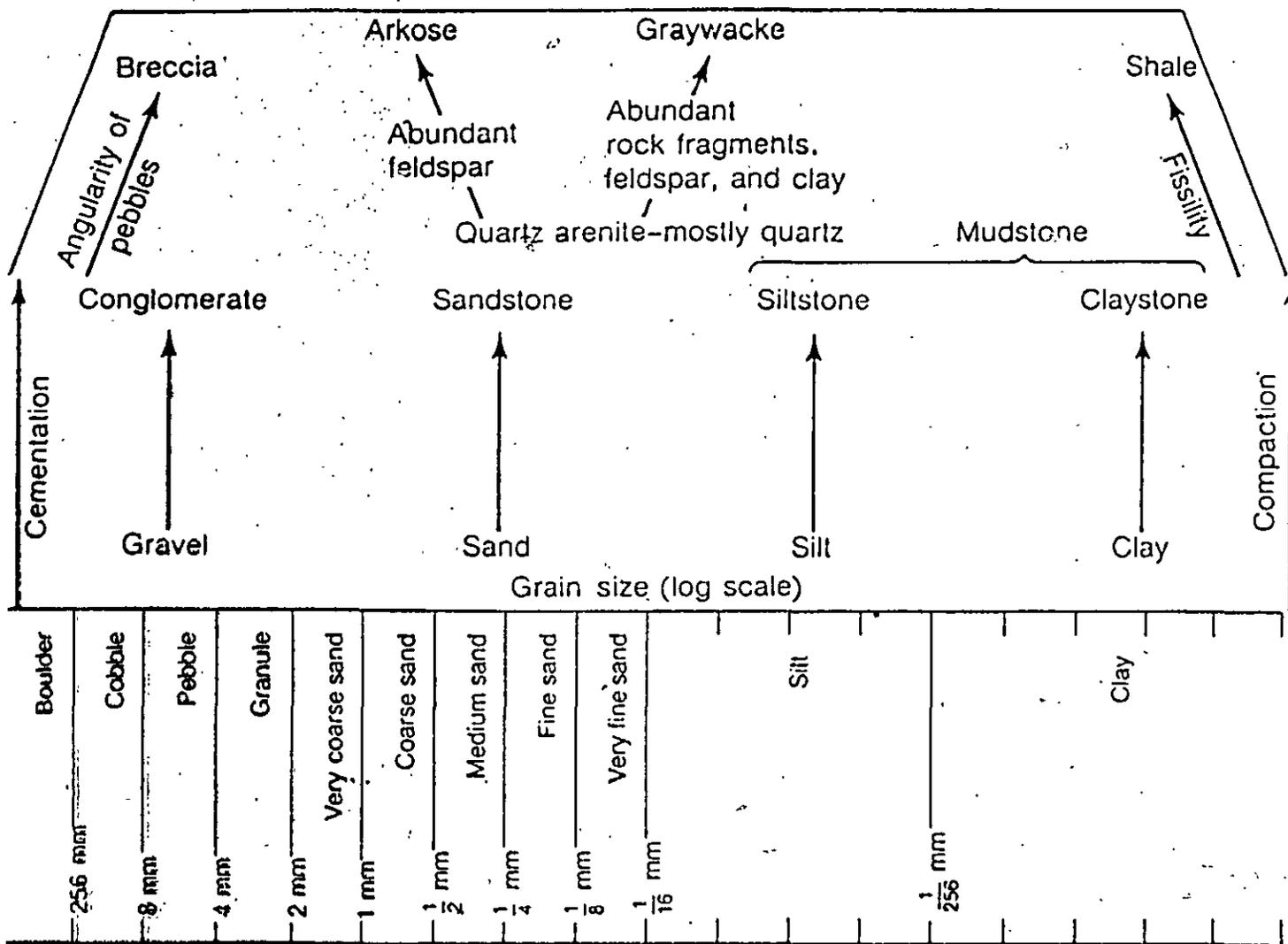


TABLA A 3.2

ESQUEMA DE IDENTIFICACIÓN DE ROCAS



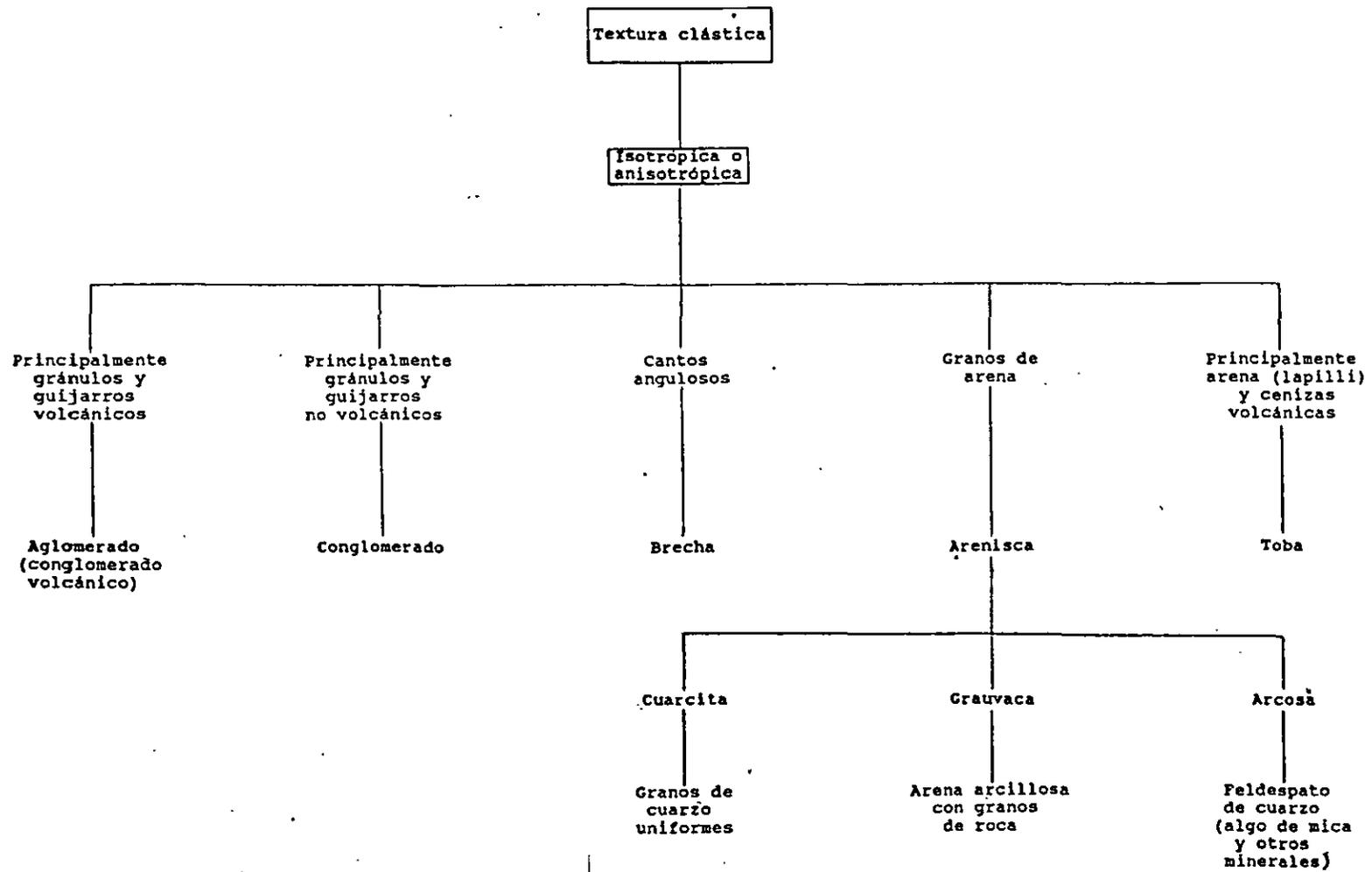


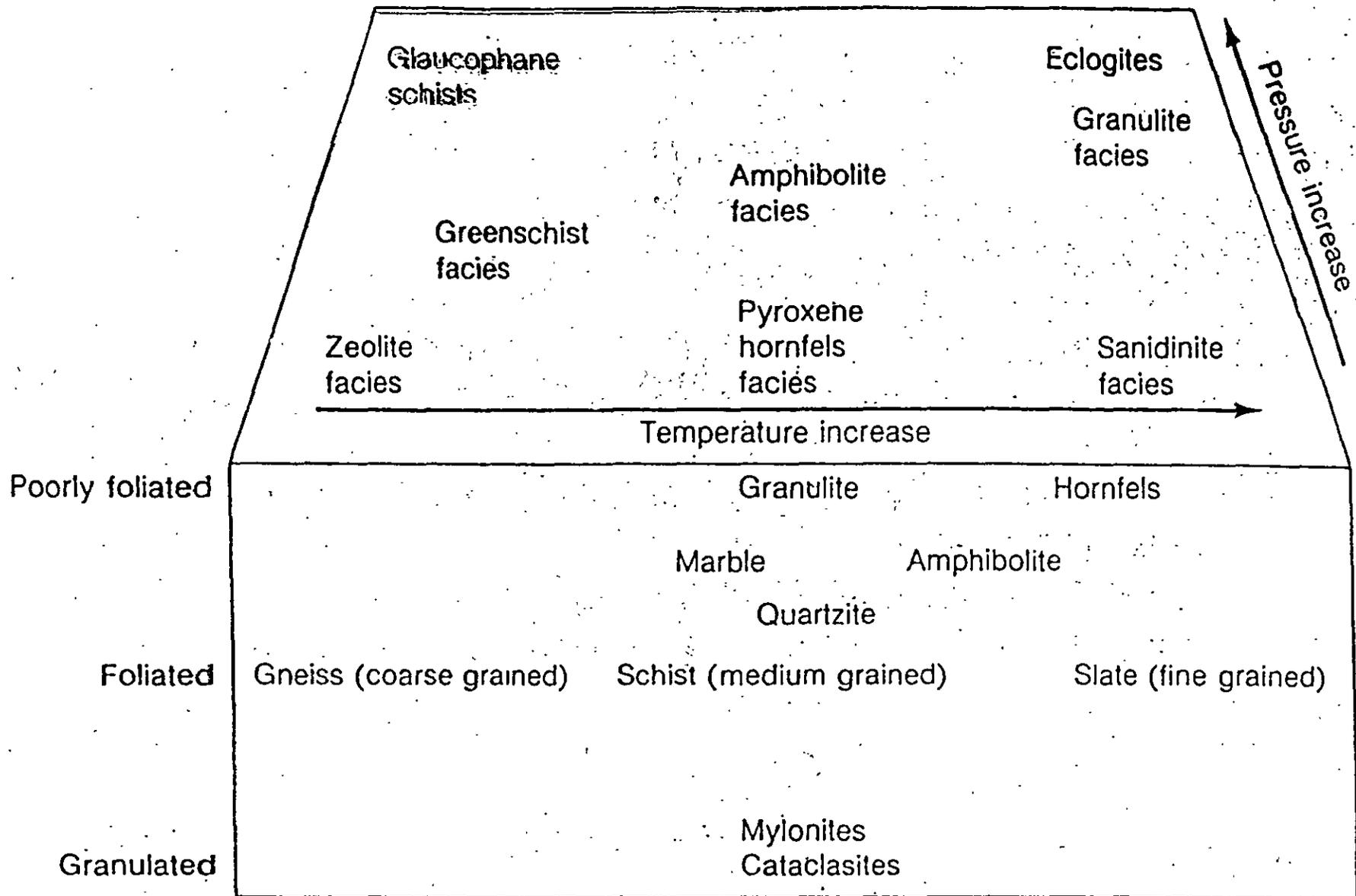
(a) Detrital sediments

| Rock | Limestone | Dolomite | Iron formation | Evaporite | Chert | Organics | Phosphate |
|----------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--|------------------------------|--------------------|---|
| Chemical composition | CaCO ₃ | CaMg(CO ₃) ₂ | Fe silicate -oxide carbonate | NaCl CaSO ₄ | SiO ₂ | Carbon | Ca ₃ (PO ₄) ₂ |
| Minerals | Calcite (aragonite) | Dolomite | Hematite Limonite Siderite | Gypsum Anhydrite Halite Other salts | Opal Chalcedony Quartz | Coal Oil Gas | Apatite |

(b) Chemical sediments

T A B L A A3.2 (continuación 2)





INTEMPERISMO QUIMICO (DESCOMPOSICIÓN)

PROCESOS PRINCIPALES

HIDRÓLISIS

Arcillas

HIDRATACIÓN

Anhidrita - Yeso

Montmorrillonita

Caolinita - Bauxita

CARBONATACIÓN

Caliza - Topografía Cárstica

OXIDACIÓN y REDUCCIÓN

Laterita

PROCESOS DE INTEMPERISMO

| | |
|-------------------------------|--|
| DEFINICIÓN: | ES LA ALTERACIÓN DE LOS MATERIALES ROCOSOS EXPUESTOS A LA ACCIÓN DE LOS ELEMENTOS; AIRE, HUMEDAD, CALOR Y LOS EFECTOS DE LA MATERIA ORGÁNICA |
| OBJETIVO: | DESINTEGRACIÓN MECÁNICA DESCOMPOSICIÓN QUÍMICA |
| AGENTE PRINCIPAL: | AGUA (SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA) |
| PRODUCTO FINAL: | SUELOS O REGOLITA. Modificación de los materiales para que sean mas estables al ambiente |
| ZONA DE INFLUENCIA: | PARTE SUPERFICIAL DE LA CORTEZA TERRESTRE y en fracturas que penetran la roca |
| TIPOS DE INTEMPERISMO: | INTEMPERISMO MECÁNICO O FÍSICO INTEMPERISMO QUÍMICO |

INTEMPERISMO MECÁNICO (DESINTEGRACIÓN)

PROCESOS PRINCIPALES

- CRECIMIENTO CRISTALINO
 - Congelamiento
 - Precipitación
 - Recristalización (hidratación)
 - Hinchamiento
- LIBERACIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES
 - Exfoliación
- EXPANSIÓN TÉRMICA DIFERENCIAL
 - Coefficiente de expansión térmica
- COLAPSO DE MASAS INESTABLES
 - Dimensiones, R_t y grado de debilitamiento por discontinuidades
- PROCESOS MENORES
 - Crecimiento de raíces de plantas
 - Efectos del fuego

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS FINOS

GÉNESIS. Partiendo de los numerosos minerales (silicatos) que se encuentran en rocas ígneas y metamórficas, los agentes de descomposición químicos llegan a un producto final: **LAS ARCILLAS**

LOS MINERALES DEL GRUPO DE LAS ARCILLAS

El geotecnista debe tener mucho cuidado siempre que encuentre arcillas en un terreno destinado a recibir cimentaciones o asentar una estructura o construcción, ya que deben preverse fenómenos "imprevistos". La identificación específica de minerales de las arcillas, la requieren los trabajos más importantes de ingeniería exigiendo complejos métodos analíticos:

Los minerales de las arcillas son:

1. Silicatos hídricos de alúmina
2. Silicatos hídricos de magnesio o de hierro

La estructura de los minerales de las arcillas son la base de su clasificación. Dividiéndose en 3 grupos:

- I. **LAS CAOLINITAS**
- II. **LAS MONTMORILLONITAS**
- III. **LAS ILLITAS O "HIDROMICAS"**

Las arcillas poseen propiedades eléctricas debido a que su peso es mínimo respecto a su superficie muy grande. Debido a esta propiedad atraen partículas de agua (dipolares) que hacen que éstas se comporten como un sólido.

I. **LAS CAOLINITAS** ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ó $H_4Al_2Si_2O_9$)

- a.- Éstas forman arcillas muy estables a causa de su estructura (laminar) inexpandible que se opone a la introducción de agua en sus retículas
- b.- Cuando están húmedas:
 - son moderadamente plásticas
 - tienden a poseer un coeficiente de fricción interno mayor que el de cualquier mineral arcilloso
- c.- A menos que contengan impurezas no están sujetas a expansión o hinchamiento cuando se saturan
- d.- La "*Halloysita*", un mineral tipo caolinita por su estructura (tabular-rodillo), fluye o se desparrama su masa al saturarse, por esto no se considera apropiado como material para terraplén

II. LAS MONTMORILLONITAS $[(OH)_4Si_8Al_4O_{70} \cdot nH_2O]$

- a.- Este mineral resulta inestable especialmente en presencia del agua, causando hinchamiento o expansión
- b.- Humedecidas poseen:
 - gran plasticidad
 - bajo coeficiente de fricción interna
- c.- En proceso de desecación queda sometida a gran contracción y agrietamiento (DILATACIÓN)
 1. Estructuras muy pesadas apoyadas en estas arcillas pueden experimentar alzamientos y daños (pavimentos y losas de construcción)
 2. Los taludes naturales o artificiales constituidos por arcillas de este tipo están sujetos a deslizamientos y fluencia en tiempo húmedo
 3. Las “*BENTONITAS*” se forman a partir de cenizas volcánicas y son una clase de este tipo de arcillas, notables por su capacidad de DILATACIÓN; esta capacidad es útil en geología ingenieril y geotecnia para impedir las fugas en depósitos, canales y pozos de perforación
 4. En canales los paramentos se construyen con una mezcla del suelo del país y arcillas tipo montmorillonita. Cuando entra en funcionamiento, el agua ocasiona la dilatación de la arcilla y de esta forma estanca los flancos y fondo del canal

III. LAS ILLITAS $[(OH)_4Ky(Si_8 \cdot Aly)(Al_4Fe_4 \cdot Mg_4 \cdot Mgi)O_{70}]$

Similar a las montmorillonitas. Las propiedades de expansión son menores y más altos sus coeficientes de fricción interna que el de las montmorillonitas

DENSIDAD

| <u>ARCILLAS</u> | <u>VALOR</u> |
|-----------------|--------------|
| CAOLINITAS | 2.60 a 2.68 |
| MONTORILLONITAS | 2.20 a 2.70 |
| ILLITAS | 2.64 a 3.00 |

IDENTIFICACION EN LABORATORIO DE LAS ARCILLAS

1. Métodos de Difracción de Rayos “X”(Halloysita y Montmorrillonita)
2. Análisis Termal Diferencial (Expulsión del agua en la arcillas)
3. Cambio de Bases (ostrácodos, ópalo - cristobalita y cuarzo -
4. Incidencia de Rayos Infrarojos (materia orgánica - diatomeas y halloysita)

NOTA CURIOSA:

KAOMYCIN

Neomicina / Caolín / Pectina

Fórmula:

Cada 100 ml contiene:

Sulfato de Neomicina equivalente a ----- 0.71 g
de Neomicina

Caolín ----- 20.00 g

Pectina ----- 1.00 g

Vehículo cbp ----- 100 ml

Evítese la congelación

CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

La mayor parte de las construcciones ingenieriles (90%) se realizan sobre suelos, p.e. aeropistas y carreteras; y solo 10% de ellas sobre rocas

DEFINICIÓN DE SUELO

“Es aquel producto de la desintegración de las rocas, del tamaño de la grava hacia abajo”
(Krynine)

“Acumulación heterogénea de granos minerales no cementados”

“Incluye prácticamente todos los tipos de materiales inorgánicos y orgánicos, cementados o no, que se encuentran en la tierra”

(Instructivo de Mecánica de Suelos, SARH, IMTA-CNA)

“Es todo material “terroso”, que abarca desde relleno hasta roca suave poco cementada, siendo un conjunto con organización definida y propiedades que siguen leyes fijas y según la acción de fuerzas naturales”

(Juárez Badillo y Rico)

“Material que se forma en la superficie de la Tierra como resultado de procesos orgánicos e inorgánicos. El suelo varía según el clima, la vida animal y vegetal, el tiempo, la pendiente del terreno y el material (rocoso) del que se deriva”

(Leet & Judson)

“Es la parte superficial de la corteza terrestre en la cual se desarrollan fenómenos bioquímicos que hacen a los materiales superficiales capaces de mantener la vida vegetal y animal)

(Edafología)

“Todo agregado natural de partículas minerales separables por medio mecánicos de poca intensidad, como, la agitación en agua”

(K. Terzaghi)

I. CLASIFICACIÓN SEGUN LA PEDOLOGÍA - EDAFOLOGÍA

II. CLASIFICACIÓN GEOLÓGICA

Los suelos pueden ser divididos, según el origen de sus elementos en:

A. Suelos cuyo origen se debe al resultado de la descomposición física y química de las rocas

B. Suelos cuyo origen es orgánico “in-situ”, p.e. turba, coquina, etc.

A. Suelos cuyo origen se debe al resultado de la descomposición física y química de las rocas

A.1. SUELO RESIDUAL.

“Son los que permanecen en el mismo lugar en que se formaron y todavía yacen directamente sobre la roca madre”

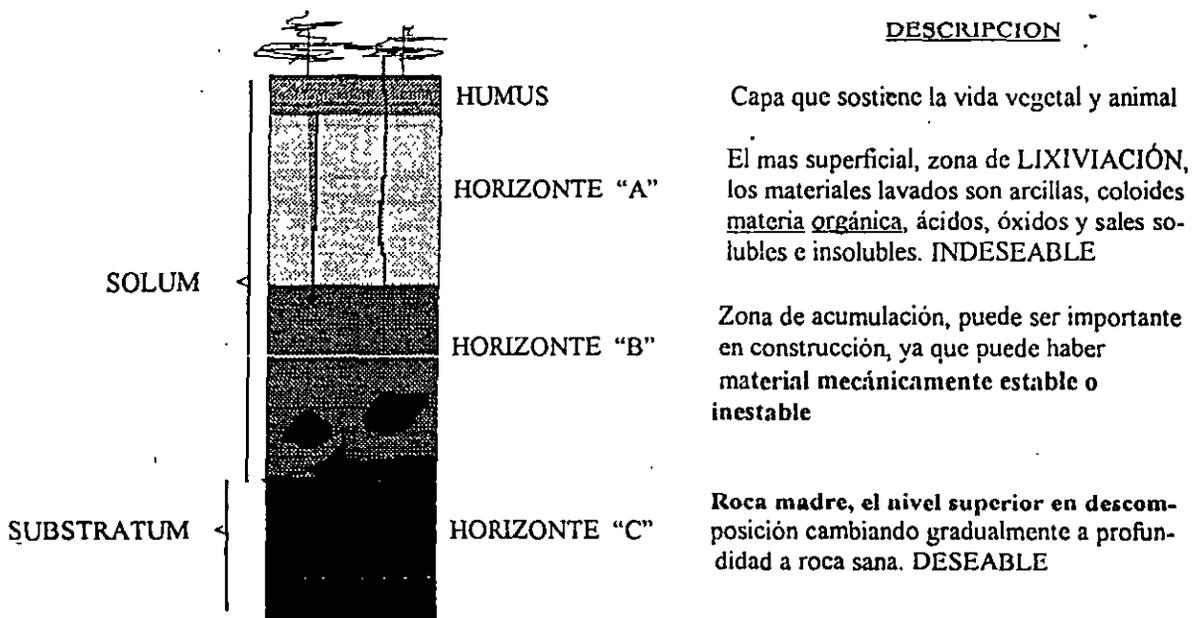
A.2 SUELO TRANSPORTADO.

“Son los que han sido llevados más o menos lejos del lecho original de la roca de que proceden, para volver a ser depositadas en otra localidad”

SUELOS RESIDUALES

Estos suelos pueden ser subdivididos en base de los minerales presentes en su horizonte A y B

Un suelo se le considera maduro cuando presenta características de zonificación vertical.



Los **FACTORES FORMACIONALES DE UN SUELO** son:

1. CLIMA
2. ORGANISMOS
3. TOPOGRAFIA
4. ROCA MADRE
5. TIEMPO

En una área de gran precipitación pluvial, los horizontes A y B de un suelo son lavados; esto es, los materiales solubles o fuertemente alterables han sido llevados (transportados) por el agua infiltrada. Los suelos resultantes son ricos en lo que no fue soluble: cuarzo, minerales arcillosos y productos de alteración de óxidos de hierro. El carbonato de calcio esta ausente. Hay abundancia en aluminio y hierro, estos son los fértiles **PEDALFERES** (Pedón - del griego - que significa suelo; "Al" y "Fe" del latín aluminio y hierro). Estos suelos generalmente se desarrollan sobre rocas ígneas ácidas como por ejemplo un granito.

Aquellos suelos que contienen minerales solubles, formados en climas secos y con altas temperaturas poseen al carbonato de calcio como constituyente fundamental y son llamados **PEDOCALES**. Estos suelos se desarrollan sobre rocas sedimentarias en regiones de baja precipitación pluvial. El Horizonte "A" esta lavado; el Horizonte "B" esta enriquecido por precipitados de carbonato de calcio, debido a la evaporación del agua contenida en el suelo. Los Pedocales contienen menos arcilla y mas silicatos sin alterar que los Pedalferes, como resultado de la baja precipitación pluvial.

Un tercer tipo de suelo es la **LATERITA**, un suelo rojo profundo de los trópicos en los cuales todos los silicatos estan completamente alterados, dejando mayormente aluminio y óxidos de hierro de los cuales el carbonato de calcio y la silice han sido lavados. Estos se originan frecuentemente sobre rocas ígneas máficas en regiones tropicales, en él todo el "solum" puede ser considerado como Horizonte "A", directamente sobreyacente de un Horizonte "C".

Si en estos suelos existe muy poco hierro en la roca madre, se formará la **BAUXITA**, una variedad especial de este tipo de suelo ricos en hidróxidos de aluminio.

Los **SUELOS RESIDUALES** que se encuentran sobre *rocas ígneas y metamórficas* son de un espesor reducido por lo que carecen de importancia para la construcción y solo si los encontramos nivelados servirán, p.e. para aeropuertos.

En *rocas sedimentarias* estos suelos se desarrollan con facilidad, de modo especial en Calizas, donde éstos suelen ser muy plásticos. En Areniscas, el cementante puede influir en las propiedades de los suelos residuales que originan. En general la plasticidad de los suelos derivados de una arenisca es baja

El "Adobe" es un tipo especial de suelo residual, originado en rocas sedimentarias (depósitos arcillosos y aluviones recientes). Es un término mexicano, para describir material de grano fino, muy plástico, de color negro o gris pardo, al secarse se fisura. Se emplea para fabricar ladrillos en edificaciones de campesinos. Puede presentar dilataciones, su densidad es alta (1.250 a 1.350) y la resistencia a la compresión simple es también alta.

SUELOS TRANSPORTADOS

Son un excelente suministro de materiales gruesos de construcción, tales como áridos para concreto o materiales permeables para relleno de las cajas de las carreteras o de sus terraplenes. Rara vez son buenos como materiales impermeables, ya que carecen de arcilla. Ejemplos de suelos transportados lo son:

- Suelos Eólicos (locss, dunas, etc.)
- Suelos Volcánicos (nubes ardientes, vulcano-lacustres, eolo-volcánicos)
- Suelos Glaciares (till, aluvio-glaciares, lacustre-glaciares, eolo-glaciares)
- Suelos Aluviales (fluviales, lacustres, marinos, aluviolacustres)
- Suelos de Gravedad (eluviales, coluviales)
- Suelos Deltáicos

III. CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA (MECÁNICA DE SUELOS)

Los suelos pueden ser divididos, según el tamaño de sus constituyentes en:

1. SUELOS GRUESOS
2. SUELOS FINOS

SUELOS GRUESOS

El comportamiento mecánico e hidráulico de un suelo grueso está dado por la Compacidad y Orientación de sus partículas. Su estudio o clasificación se efectúa mediante un método denominado **GRANULOMETRÍA**

Los suelos gruesos bien graduados, o sea, con amplia gama de tamaños, tienen un comportamiento ingenieril más favorable, definido por la compacidad y la orientación de las partículas.

Sistemas de Clasificación de Suelos Basadas en Criterios de Granulometría

Los límites de tamaño de las partículas que constituyen un suelo, ofrecen un criterio para una clasificación descriptiva del mismo.

Existen varias (3 por lo menos) clasificaciones de este tipo, una de las más utilizadas es la de "Kopeky", propuesta en Alemania en 1936

| MATERIAL | CARACTERISTICAS | TAMAÑO mm |
|------------------------|-----------------|------------------|
| PIEDRA | | mayor 70 mm |
| GRAVA | Gruesa | 30.0 - 70.0 |
| | Media | 5.0 - 30.0 |
| | Fina | 2.0 - 5.0 |
| ARENA | Gruesa | 1.0 - 2.0 |
| | Media | 0.2 - 1.0 |
| | Fina | 0.1 - 0.2 |
| POLVO | Grueso | 0.05 - 0.1 |
| | Fino | 0.02 - 0.05 |
| LIMO | Grueso | 0.006 - 0.02 |
| | Fino | 0.002 - 0.006 |
| ARCILLA | Grueso | 0.0006 - 0.002 |
| | Fina | 0.0002 - 0.0006 |
| ULTRA ARCILLA Coloides | | 0.00002 - 0.0002 |

Existe también la Clasificación del Instituto Tecnológico de Massachusetts - MIT - del investigador G. Gilboy

| MATERIAL | CARACTERISTICA | TAMAÑO mm |
|----------|-----------------|-----------|
| ARENA | GRUESA | 2.0 |
| | MEDIA | 0.6 |
| | FINA | 0.2 |
| LIMO | GRUESA | 0.06 |
| | MEDIA | 0.02 |
| | FINA | 0.006 |
| ARCILLA | GRUESA | 0.002 |
| | MEDIA | 0.0006 |
| | FINA (Coloides) | 0.0002 |
| | | 0.00001 |

Una más es la Clasificación de C.K. Wentworth (1922), empleada frecuentemente por los sedimentólogos y geólogos, la cual ha sufrido modificaciones en el transcurso de la historia

| | US Standard sieve mesh | Millimeters | Phi (φ) units | Wentworth size class |
|--------|----------------------------|-------------|------------------|------------------------|
| GRAVEL | Use wire squares | 4096 | -12 | |
| | | 1024 | -10 | boulder <i>BLOQUES</i> |
| | | 256 | -8 | |
| | | 64 | -6 | cobble <i>GUIJANO</i> |
| | | 16 | -4 | |
| | 5 | 4 | -2 | pebble <i>GUIJERO</i> |
| | 6 | 3.36 | -1.75 | |
| | 7 | 2.83 | -1.5 | granule |
| | 8 | 2.38 | -1.25 | |
| | 10 | 2.00 | -1.0 | |
| SAND | 12 | 1.68 | -0.75 | |
| | 14 | 1.41 | -0.5 | very coarse sand |
| | 16 | 1.19 | -0.25 | |
| | 18 | 1.00 | 0.0 | |
| | 20 | 0.84 | 0.25 | |
| | 25 | 0.71 | 0.5 | coarse sand |
| | 30 | 0.59 | 0.75 | |
| | 35 | 0.50 | 1.0 | |
| | 40 | 0.42 | 1.25 | |
| | 45 | 0.35 | 1.5 | medium sand |
| | 50 | 0.30 | 1.75 | |
| | 60 | 0.25 | 2.0 | |
| | 70 | 0.210 | 2.25 | |
| | 80 | 0.177 | 2.5 | fine sand |
| 100 | 0.149 | 2.75 | | |
| 120 | 0.125 | 3.0 | | |
| 140 | 0.105 | 3.25 | | |
| 170 | 0.088 | 3.5 | very fine sand | |
| 200 | 0.074 | 3.75 | | |
| 230 | 0.0625 | 4.0 | | |
| SILT | 270 | 0.053 | 4.25 | |
| | 325 | 0.044 | 4.5 | coarse silt |
| | | 0.037 | 4.75 | |
| | | 0.031 | 5.0 | |
| | | 0.0156 | 6.0 | medium silt |
| | | 0.0078 | 7.0 | fine silt |
| CLAY | Use pipette or hydro-meter | 0.0039 | 8.0 | very fine silt |
| | | 0.0020 | 9.0 | |
| | | 0.00098 | 10.0 | clay |
| | | 0.00049 | 11.0 | |
| | | 0.00024 | 12.0 | |
| | | 0.00012 | 13.0 | |
| | 0.00006 | 14.0 | | |

Entonces los sistemas clasificatorios consisten en 2 tipos de análisis mecánicos que son:

1. CRIBADO
2. ANÁLISIS POR SUSPENSIÓN

Cuyos resultados son vaciados en sistemas gráficos que se denominan **CURVAS GRANULOMÉTRICAS**

ETAPAS EXPLORACION PARA UNA OBRA CIVIL

| Etapa | Estudio | Desarrollo | |
|-------|------------|--|---|
| I | Topografía | Recopilación de la información disponible Fotogrametría. | |
| | Geotecnia | Recopilación bibliográfica y cartográfica Estudio de sensores remotos (fotogeología y otros). Recorridos de campo. | |
| II | Topografía | Fotogrametría. Levantamientos topográficos. | |
| | Geotecnia | Levantamiento Geotécnico | -Litología, estratigrafía, estructuras. -Reconocimiento de discontinuidades (fallas, fracturas, etc.). -Fenómenos geodinámica externa e interna. |
| | Geotecnia | Geofísica | -Localización de roca sana. -Localización del nivel de aguas freáticas. -Estratigrafía. -Calidad de los materiales. |
| | Geotecnia | Perforaciones | -Muestras de suelos (alteradas e inalteradas). -Recuperación núcleos de roca y muestreo integral. -Inspección de las paredes de los pozos (TV y fotografías). |
| | Geotecnia | Excavaciones | -Muestras cúbicas suelos y rocas -Estratigrafía. -Características estructurales de los macizos rocosos. -Observación fallas y fracturas. |
| | Geotecnia | Pruebas de Campo | -Resistencia y deformabilidad. -Permeabilidad. -Estado de esfuerzos tectónicos. |
| | Geotecnia | Pruebas de Laboratorio | -Propiedades índice. -Propiedades mecánicas. -Mineralogía y petrología. |
| III | Geotecnia | Localización y cubicación de bancos y ensayos de Materiales. | -Obtención de materiales de construcción. -Definición de métodos constructivos. |
| IV | Geotecnia | Instrumentación y Control | -Piezometría. -Instrumentación de fallas y taludes. -Pruebas de inyección. -Influencia de la obra en los procesos geológicos. |

DATOS GEOLOGICOS REQUERIDOS

| DATOS GEOLOGICOS | TIPO DE OBRA | | | | | | | | | | |
|-----------------------|--------------|------|--------------|---------------------------|-----------------|---------------------|-------|--------|--------|------------|-------------|
| | PRESA | | OBRA SUBT | EXCAV. A CIELO ABIERTO | VIAS TERREST | LINEA DE TRANSMI | CANAL | PUENTE | PUERTO | AEROPUERTO | CIMENTACIÓN |
| | CORTINA | VASO | | | | | | | | | |
| 1. LITOLOGIA | | | | | | | | | | | |
| 1.1. SUELOS | | | | | | | | | | | |
| ESPESOR EN METROS | E | | E | E | E | E | E | E | E | E | E |
| EXTENSIÓN | RE | R | RE | RE | RE | RE | RE | RE | RE | RE | RE |
| CLASIFICACIÓN | RE | R | RE | RE | RE | RE | RE | RE | RE | RE | RE |
| COMPOSICIÓN | E | | EC | E | E | E | E | E | E | E | E |
| TEXTURA | E | | E | E | E | E | E | E | E | E | E |
| ESTRUCTURA | EC | | E | EC | E | E | EC | E | E | EC | EC |
| POROSIDAD | E | | E | E | E | E | E | E | EC | EC | EC |
| PERMEABILIDAD | E | E | E | EC | E | E | EC | E | E | EC | EC |
| 1.2. ROCAS | | | | | | | | | | | |
| PROFUNDIDAD ROCA SANA | EC | | | EC | E | E | E | E | E | E | E |
| CLASIFICACIÓN | RE | R | RE | RE | RE | RE | RE | RE | RE | RE | RE |
| TEXTURA | RE | | RE | RE | R | E | RE | E | E | R | E |
| ESTRUCTURA | RE | | RE | RE | RE | RE | RE | RE | E | E | RE |
| POROSIDAD | RE | R | RE | RE | RE | E | EC | E | E | E | EC |
| PERMEABILIDAD | RE | C | RE | RE | E | E | EC | EC | E | E | EC |
| RECUPERACIÓN | E | | E | | | | | E | E | E | E |
| RQD | E | | E | | | | | E | E | E | E |

R -- ETAPA DE RECONOCIMIENTO PRELIMINAR
 E -- ETAPA DE EXPLORACIÓN
 C -- CONSTRUCCIÓN
 O -- OPERACIÓN



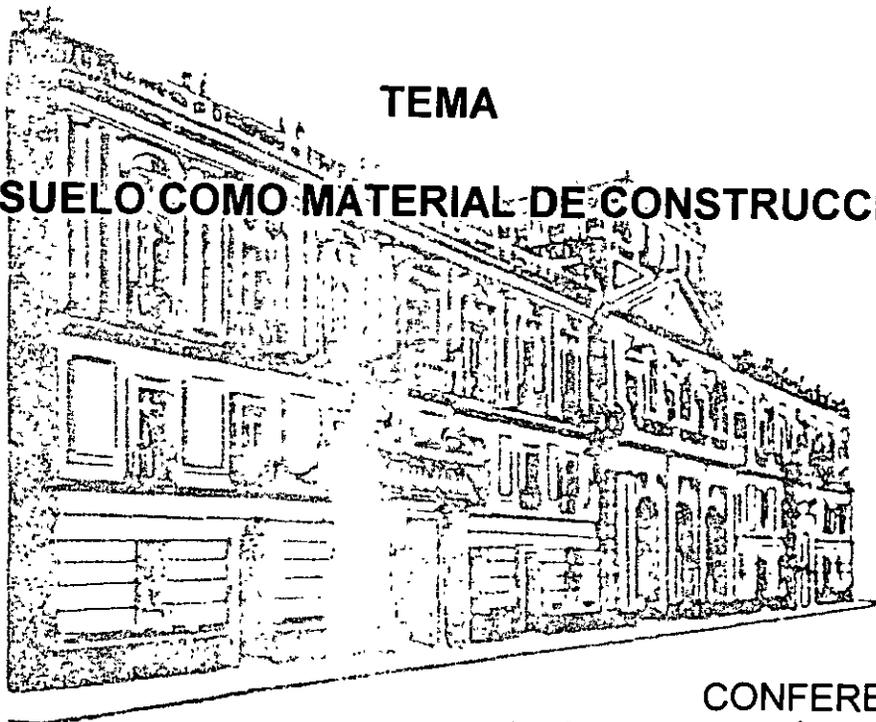
**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS I

TEMA

EL SUELO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN



**CONFERENCISTA
DR. GABRIEL AUVINET G.
PALACIO DE MINERÍA
MAYO 2000**

EL SUELO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

Bancos de Materiales

Definición. Es un lugar constituido por roca o material granular (grava, arena, arcilla, etc.) susceptible de ser utilizada en la construcción

Los sitios de donde el geomaterial (suelo o roca) se extrae de sus lechos naturales y se separa para su utilización en la construcción se conoce en la terminología ingenieril como **CANTERAS**

Los bancos de materiales para elementos granulares (suelos) son localizados principalmente en el sitio donde han sido depositados después de ser transportados por un agente de erosión (suelos transportados)

En la actualidad es posible obtenerlos mecánicamente pero la explotación de bancos es mas económica.

Los productos de un banco de materiales con estas características son:

Arena y Grava

La arena y la grava se emplean en ingeniería para hacer CONCRETO y para su emplazamiento en las partes del terreno o de las estructuras en que sea necesario la permeabilidad. Por ejemplo, cajas de carreteras, avenamiento, balasto o en proyectos de grandes edificaciones se colocan en el piso almohadones de arena y grava con la finalidad de rotura capilar.

Las principales fuentes de grava y arena son:

- Conos de Deyección Fragmentos de roca, guijarros y finos angulosos y subredondeados con poca estratificación y lentes
- Depósitos de Terrazas Arena y grava bien estratificados, clasificados y redondeados. PRECAUCIÓN muy meteorizados o con óxido de hierro o sílice son dañinos para el concreto
- Planicies Aluviales Grano fino, arenas y gravas
- Morrenas Harina de roca, gravas gruesas o bloques
- Dunas de Arena Uniformes
- Depósitos Residuales Arena, distribución limitada y meteorizadas
- Depósitos Deltaicos Arena, limo y arcilla en exceso
- Depósitos Lacustres Arcilla y limo únicamente

Arcilla

Utilizada en la construcción de cortinas de presas o en carreteras debe cumplir con tres condiciones:

- ⇒ Resistencia y Cohesión
- ⇒ Permeabilidad apropiada para su funcionamiento adecuado
- ⇒ No debe retraerse ni expanderse excésivamente
- ⇒ No deformarse por efecto de carga
- ⇒ Conservar resistencia e incompresibilidad

La arcilla no debe contener halloysita ya que esta posee baja resistencia al saturarse, cuando se clasifica como tillita resulta útil para construcción. Por otra parte, si se localizan pizarras arcillosas, el uso de éstas en una cortina de una presa resulta de utilidad cuando se alterna con capas de arenisca

La arcilla es usada como ya se mencionó en cortinas de presas de tierra, en terraplenes, carreteras, adobes, tejas, ladrillos y cerámica (azulejos) y fachaletas. La combinación de la plasticidad, al endurecimiento a la acción del calor y una contracción uniforme determina la utilidad de una arcilla para eleborar ladrillos.

Los ladrillos prensados de alta calidad se fabrican de arcillas o pizarras arcillosas puras o con arcillas refractarias de clase inferior

Los ladrillos para pavimentación se fabrican con arcillas que vitrifican a temperaturas moderadas

Existe la creencia que el color de los ladrillos indican su calidad, pero no hay relación entre color y calidad. La arcilla pura es blanca y el color rojizo se debe a óxidos y sustancias carbonosas, Al cocerse las arcillas blancas se conservan igual y los coloreados proceden de arcillas color rojo o abigarrado del óxido de hierro y el ladrillo adquiere una coloración crema o amarillento si hay carbonato de calcio

En EUA donde no existen bancos de roca, las arcillas cocidas pueden utilizarse como BALASTO y también como revestimiento de protección en taludes de cortinas de tierra en las presas

En regiones áridas se usa ADOBE mezclándolo con forraje y estiércol para alcanzar buena plasticidad y secado al sol. En regiones costeras, la arcilla se usa en muros para cubrir entramado de carrizo o varas. En regiones semi-áridas se usa en entramado de muros y techos

Otras aplicaciones de la arcilla son: los LADRILLOS huecos y la terracota que hoy se emplean en el entramado de edificios de acero o de concreto armado; para la fabricación de TUBERÍAS, la arcilla debe contener una alta proporción de fundentes para que vitrifiquen; fabricación de LOZA y AZULEJOS se emplean arcillas refractarias a veces con adición de arena

TEMA I

PRUEBAS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS DE CAMPO

La utilidad de la identificación de los suelos es básica en la ingeniería, ya que de esta manera se pueden conocer de manera cualitativa las propiedades mecánicas e Hidráulica de los mismos según el grupo de suelo en que se sitúen.

La ubicación de un suelo en un determinado grupo se hace, como es conocido, mediante la combinación de los resultados de análisis de laboratorio. Sin embargo, en ocasiones, en campo un ingeniero con cierto conocimiento de los suelos puede efectuar pruebas sencillas que lo llevan a poder identificar a un suelo de manera aproximada cuando no tenga el equipo de laboratorio para una identificación más precisa. A continuación se mencionan algunas de ellas.

Tamaño y granulometría de las partículas

Sin pretender dar una explicación muy detallada sobre este aspecto, se puede observar la tabla que para este fin se ha incluido dentro de estas notas, en donde se dan comparaciones quizás muy burdas, pero que para fines prácticos dan una buena idea sobre la clasificación de los suelos de acuerdo a su tamaño. la tabla referida se le llamó " *Identificación por el tamaño de los granos* "

Dilatancia o reacción al sacudido.

Este ensayo es útil para la identificación de suelo con partículas finas. Después de quitar las partículas mayores que la malla N° 40 (0.42 mm) se prepara una porción de suelo húmedo suficiente para que quepa en la palma de la mano. Deberá quedar una masa suave pero no

pegajosa. Una vez que esta pasta este en la mano se agita golpeando secamente una mano contra la otra varias veces. Si en la superficie del suelo aparece agua mientras se agita, esta superficie cambia a veces de color, y a veces adquiriendo una apariencia de hígado. Cuando la muestra se aprieta entre los dedos, desaparece de la superficie el agua y el brillo el suelo se vuelve tieso y finalmente agrieta y desmorona.

una reacción de este tipo (rápida), ocurre en arenas finas, uniformes y no plásticas, así como en algunos limos inorgánicos.

Cuando se tiene algún contenido de arcilla, esta le proporciona algo de plasticidad al suelo y la reacción del agua al movimiento es menos rápida. Una reacción muy lenta o francamente inexistente corresponde a arcillas de alta plasticidad.

Resistencia al fracturamiento en estado seco

Quitando las partículas de tamaño mayor a la malla N° 40 se moldea una pastilla de suelo hasta alcanzar una consistencia de masilla, añadiendo agua si esto es necesario. Se deja secar la pastilla al sol o simplemente al aire, y una vez seco se prueba su resistencia al corte apretándola entre los dedos. La resistencia a la ruptura es una medida de la cantidad de la fracción coloidal que contiene el suelo.

La resistencia al corte en estado seco de un suelo aumenta al aumentar la plasticidad del mismo. Una alta resistencia es característica de las arcillas del grupo CH y CH. Los limos no plásticos solo poseen una pequeña resistencia en seco, mientras que las arenas finas limosas se parten inmediatamente.

Tenacidad

Con las indicaciones iniciales de la prueba de dilatancia, se prepara una masilla de suelo agregando o secando por evaporación hasta adquirir una consistencia de plastilina suave. En este estado se rola en la palma de la mano hasta alcanzar un rollito de unos 3 mm de diámetro.

Se amasa y se vuelve a rolar varias veces. Durante este proceso el rollito de suelo se llega a poner tieso por la pérdida de agua, perdiendo plasticidad hasta que finalmente se desmorona en el estado de plástico.

La mayor o menor tenacidad de la barrita al acercarse al límite plástico es indicativo de la preponderancia de la fracción arcillosa del suelo. La debilidad del rollo en el límite plástico indica la presencia de arcilla inorgánica de baja plasticidad.

DIFERENCIAS ENTRE GRAVAS Y ARENAS

| Gravas (> 2 mm) | Arenas (entre 0,06 y 2 mm) |
|--|--|
| <p>Los granos no se apelmazan aunque estén húmedos, debido a la pequeñez de las tensiones capilares.</p> <p>Cuando el gradiente hidráulico es mayor que 1, se produce en ellas flujo turbulento.</p> <p>Es difícil perforar un túnel en gravas con agua mediante aire comprimido, porque la pérdida de aire es muy alta.</p> | <p>Los granos se apelmazan si están húmedos, debido a la importancia de las tensiones capilares.</p> <p>No se suele producir en ellas flujo turbulento aunque el gradiente hidráulico sea mayor que 1.</p> <p>El aire comprimido es adecuado para perforar en ellas.</p> |

DIFERENCIAS ENTRE ARENAS Y LIMOS

| Arenas (entre 0,06 y 2 mm) | Limos (entre 0,002 y 0,06 mm) |
|--|--|
| <p>Partículas visibles.</p> <p>En general, no plásticas.</p> <p>Los terrenos secos tienen una ligera cohesión, pero se reducen a polvo fácilmente entre los dedos.</p> <p>Fácilmente erosionadas por el viento.</p> <p>Fácilmente drenadas mediante bombeo.</p> <p>Los asentamientos de las construcciones realizadas sobre ellas suelen estar terminados al acabar la construcción.</p> | <p>Partículas invisibles.</p> <p>En general, algo plásticos.</p> <p>Los terrones secos tienen una cohesión apreciable, pero se pueden reducir a polvo con los dedos.</p> <p>Difícilmente erosionados por el viento.</p> <p>Casi imposible de drenar mediante bombeo.</p> <p>Los asentamientos suelen continuar después de acabada la construcción.</p> |

DIFERENCIAS ENTRE LIMOS Y ARCILLAS

| Limos (entre 0,002 y 0,06 mm) | Arcillas (< 0,002 mm) |
|--|---|
| <p>No suelen tener propiedades coloidales.</p> <p>A partir de 0,002 mm, y a medida que aumenta el tamaño de las partículas, se va haciendo cada vez mayor la proporción de minerales no arcillosos.</p> <p>Tacto áspero.</p> <p>Se secan con relativa rapidez y no se pegan a los dedos.</p> <p>Los terrones secos tienen una cohesión apreciable, pero se pueden reducir a polvo con los dedos.</p> | <p>Suelen tener propiedades coloidales.</p> <p>Consisten en su mayor parte en minerales arcillosos.</p> <p>Tacto suave.</p> <p>Se secan lentamente y se pegan a los dedos.</p> <p>Los terrones secos se pueden partir, pero no reducir a polvo con los dedos.</p> |

IDENTIFICACION POR EL TAMAÑO DE GRANOS

| <i>Nombre</i> | <i>Límites de tamaño</i> | <i>Ejemplo vulgar</i> |
|---------------|--|---|
| Boleo | 305 mm o mayores (12 pulgadas) | Mayor que una pelota de balon- cesto. |
| Canto rodado | 76 mm a 305 mm (3 a 12 pulgadas) | Naranja-Sandía |
| Grava gruesa | 19 mm a 76 mm (¾ a 3 pulgadas) | Uva-naranja |
| Grava fina | 4.76 mm a 19 mm (malla 4 a ¾ pulgada) | Chicharo-uva |
| Arena gruesa | 2 mm a 4.76 mm (malla 10 a malla 4) | Sal de cocina |
| Arena mediana | 0.42 mm a 2 mm (malla 40 a malla 10) | Azúcar |
| Arena fina | 0.074 mm a 0.42 mm (malla 200 a malla 40) | Azúcar en polvo |
| Finos | menores de 0.074 mm (malla 200) | |

Las partículas menores que la arena fina no se pueden distinguir a simple vista a una distancia de 20 cm.

PRINCIPALES TIPOS DE SUELOS

De acuerdo con el origen de sus elementos (aspecto que ya se ha desglosado en la definición) los suelos se dividen en dos amplios grupos: suelos cuyo origen se debe a la descomposición física y/o química de las rocas o sean los suelos inorgánicos, y suelos cuyo origen es principalmente orgánico.

Si en los suelos inorgánicos el producto del intemperismo de las rocas permanece en el sitio donde se formó, da origen a un *suelo residual*, en caso contrario forman un *suelo transportado*, cualquiera que haya sido el agente transportador, (por gravedad: talus; por el agua: aluviales o lacustres; por el viento: eólicos; por los glaciares: depósitos glaciales).

En cuanto a los suelos orgánicos, ellos se forman casi siempre *in situ*. Muchas veces la cantidad de materia orgánica, ya sea en forma de humus o de materia no descompuesta, o en su estado de descomposición es tan alta, con relación a la cantidad de suelo inorgánico, que las propiedades que pudieran derivar de la porción mineral quedan eliminadas. Esto es muy común en las zonas pantanosas en las cuales los restos de la vegetación acuática llegan a formar verdaderos depósitos de gran espesor, conocidos con el nombre genérico de *turbas*. Se caracterizan por su color negro o café oscuro, por su poco peso cuando están secos y su gran compresibilidad y porosidad. La turba es el primer paso de la conversión de la materia vegetal en carbón.

A continuación se describen los suelos más comunes con los nombres generalmente utilizados por el ingeniero civil para su identificación.

GRAVAS.— Las gravas son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y que tienen más de dos milímetros de diámetro. Dado el origen de las gravas, las aristas de sus fragmentos han sufrido desgaste y son por lo tanto redondeadas. Como material suelto suele encontrarse en los lechos, en las márgenes y en los conos de deyección de los ríos, también en muchas depresiones de terrenos rellenadas por el acarreo de los ríos y en muchos otros lugares a los cuales las gravas han sido retransportadas. Las gravas ocupan grandes extensiones, pero casi siempre se encuentran con una mayor o menor proporción de cantos rodados, arenas, limos y arcillas.

La forma de las partículas de las gravas y su relativa frescura mineralógica, dependen de la historia de la formación de ellas, encontrán-

dose variaciones desde elementos rodados a los poliédricos.

ARENAS.— La arena es el nombre que se le dá a los materiales de grano fino procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial y cuyas partículas varían entre 2 mm. y 0.05 mm. de diámetro.

El origen, y también la existencia de las arenas, es análoga a la de las gravas; las dos suelen encontrarse juntas en el mismo depósito. La arena de río contiene muy a menudo proporciones relativamente grande de grava y arcilla. Las arenas son materiales que, estando limpias, no se contraen al secarse, no son plásticas, son mucho menos compresibles que la arcilla y si se aplica una carga en su superficie, se comprimen casi instantáneamente.

LIMOS.— Los limos son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, pudiendo ser *limo inorgánico* como el producido en canteras o *limo orgánico* como el que suele encontrarse en los ríos, siendo este último, casi siempre, de características plásticas. El diámetro de las partículas de los limos está comprendido entre 0.05 mm. y 0.005 mm.

Los limos sueltos y saturados son completamente inadecuados para soportar cargas por medio de zapatas. Su color varía desde gris claro a muy oscuro. La permeabilidad de los limos orgánicos es muy baja y su compresibilidad muy alta.

ARCILLAS.— Se le dá el nombre de arcilla a las partículas sólidas con diámetro menor de 0.005 mm. y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. Químicamente es un silicato de alúmina hidratado, aunque en no pocas ocasiones contienen también silicatos de hierro o de magnesio hidratados. La estructura de estos minerales es, generalmente, cristalina y complicada, con sus átomos dispuestos en forma laminar.

De hecho se puede decir que hay dos tipos clásicos de tales láminas, uno de ellos del tipo silícico y el otro del tipo aluminico.

Una lámina del tipo silícico se encuentra formada por un átomo de silicio rodeado de cuatro átomos de oxígeno, arreglándose el conjunto en forma de tetraedro. Estos tetraedros se agrupan entre sí formando una unidad hexagonal la cual se repite indefinidamente constituyendo una redícula laminar. La unión entre cada dos tetraedros se lleva a cabo mediante un mismo átomo de oxígeno.

Ahora bien, de acuerdo con su arreglo reticular los minerales de arcilla se pueden clasificar en tres grupos básicos que son:

a) El *caolinitico* (del nombre chino Kau-ling) que procede de la carbonatación de la ortoclasa. Las arcillas caoliniticas están formadas por una lámina silícica y una lámina aluminica superpuestas indefinidamente y con una unión tal entre sus retículas que no permiten la penetración de moléculas de agua entre ellas, pues producen una capa electrónicamente neutral, lo que induce desde luego a que estas arcillas sean bastante estables en presencia del agua.

b) El *montmorilonítico* (que deben su nombre a Montmorillon, Francia), al cual pertenecen las bentonitas, se forman por la superposición indefinida de una lámina aluminica entre dos láminas silícicas, pero con una unión débil entre sus retículas lo que hace que el agua pueda penetrar en su estructura con facilidad. Estas arcillas en contacto con agua sufren fuerte expansión provocando inestabilidad en ellas.

c) El *ilitico* (que deben su nombre a Illinois, U.S.A.) que son el producto de la hidratación de las micas y que presentan un arreglo reticular similar al de las montmoriloníticas, pero con la tendencia a formar grumos, por la presencia de iones de potasio, lo que reduce el área expuesta al agua y por lo mismo no son tan expansivas como las arcillas montmoriloníticas.

En general las arcillas, ya sean caoliniticas, montmoriloníticas o iliticas, son plásticas se contraen al secarse, presentan marcada cohesión según su humedad, son compresibles y al aplicárseles una carga en su superficie se comprimen lentamente. Otra característica interesante, desde el punto de vista de la construcción, es que la resistencia perdida por el remoldeo se recupera parcialmente con el tiempo. Este fenómeno se conoce con el nombre de *tixotropía* y es de naturaleza físico-química.

Además de los clásicos suelos indicados con anterioridad, se encuentran en la naturaleza ciertos suelos especiales que a continuación se indican.

CALICHE. El término *caliche* se aplica a ciertos estratos de suelo cuyos granos se encuentran cementados por carbonatos calcáreos. Parece ser que para la formación de los caliches es necesario un clima semi-árido. La marga es una arcilla con carbonato de calcio, más homogénea que el caliche y generalmente muy compacta y de color verdoso.

LOESS. Los loess son sedimentos eólicos uniformes y cohesivos. Esa cohesión que poseen es debida a un cementante del tipo calcáreo y su color es generalmente castaño claro. El diámetro de las partículas de los loess está comprendido entre 0.01 y 0.05 mm. Los loess se distin

guen porque presentan agujeros verticales que han sido dejados por raíces extinguidas. Los *loess modificados* son aquellos loess que han perdido sus características debido a procesos geológicos secundarios, tales como inmersión temporaria, erosión y formación de nuevo depósito. Debido al contenido calcáreo los cortes hechos en loess se mantienen generalmente, casi verticales.

DIATOMITA.- Las diatomitas o *tierras diatomáceas* son depósitos de polvo silícico, de color blanco generalmente, compuesto total o parcialmente por residuos de *diatomeas*. Las *diatomeas* son algas unicelulares microscópicas de origen marino o de agua dulce presentando las paredes de sus células características silícicas.

GUMBO.- Es un suelo arcilloso fino, generalmente libre de arena y que parece cera a la vista y al tacto, es pegajoso, muy plástico y esponjoso. Es un material difícil de trabajar.

TEPETATE.- Es un material pulverulento, de color café claro o café oscuro, compuesto de arcilla, limo y arena en proporciones variables, con un cementante que puede ser la misma arcilla o el carbonato de calcio. Según sea el componente predominante, el tepetate se suele llamar *arcilloso*, *limoso*, *arenoso*, *arcillo-limoso* si es que predomina la arcilla, *areno-limoso* si predomina la arena, *limo-arenoso* si predomina el limo, y así sucesivamente.

La mayoría de las veces el tepetate debe su origen a la descomposición y alteración, por intemperismo, de cenizas volcánicas basálticas. Pueden encontrarse dentro del tepetate capas o lentes de arena y cenizas basálticas que no tuvieron tiempo de intemperizarse cuando fueron cubiertas por una capa que sí se alteró. También suelen encontrarse lentes de piedra pómez dentro del tepetate.

En la página siguiente se muestran los símbolos recomendables para distinguir los suelos en un perfil determinado.



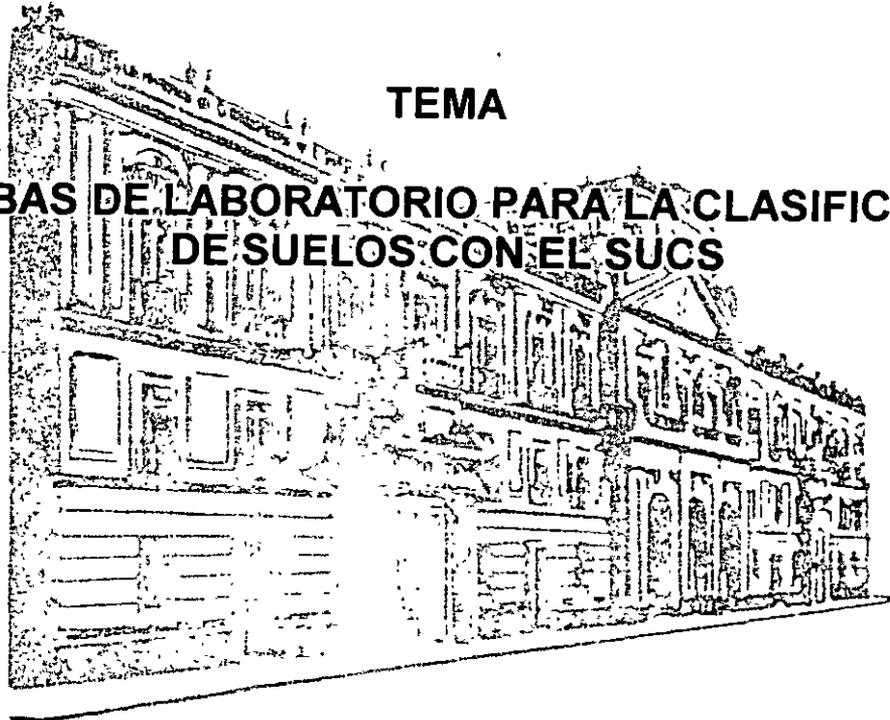
**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS I

TEMA

**PRUEBAS DE LABORATORIO PARA LA CLASIFICACIÓN
DE SUELOS CON EL SUCS**



**CONFERENCISTA
DR. RIGOBERTO RIVERA CONSTANTINO
PALACIO DE MINERÍA
MAYO 2000**

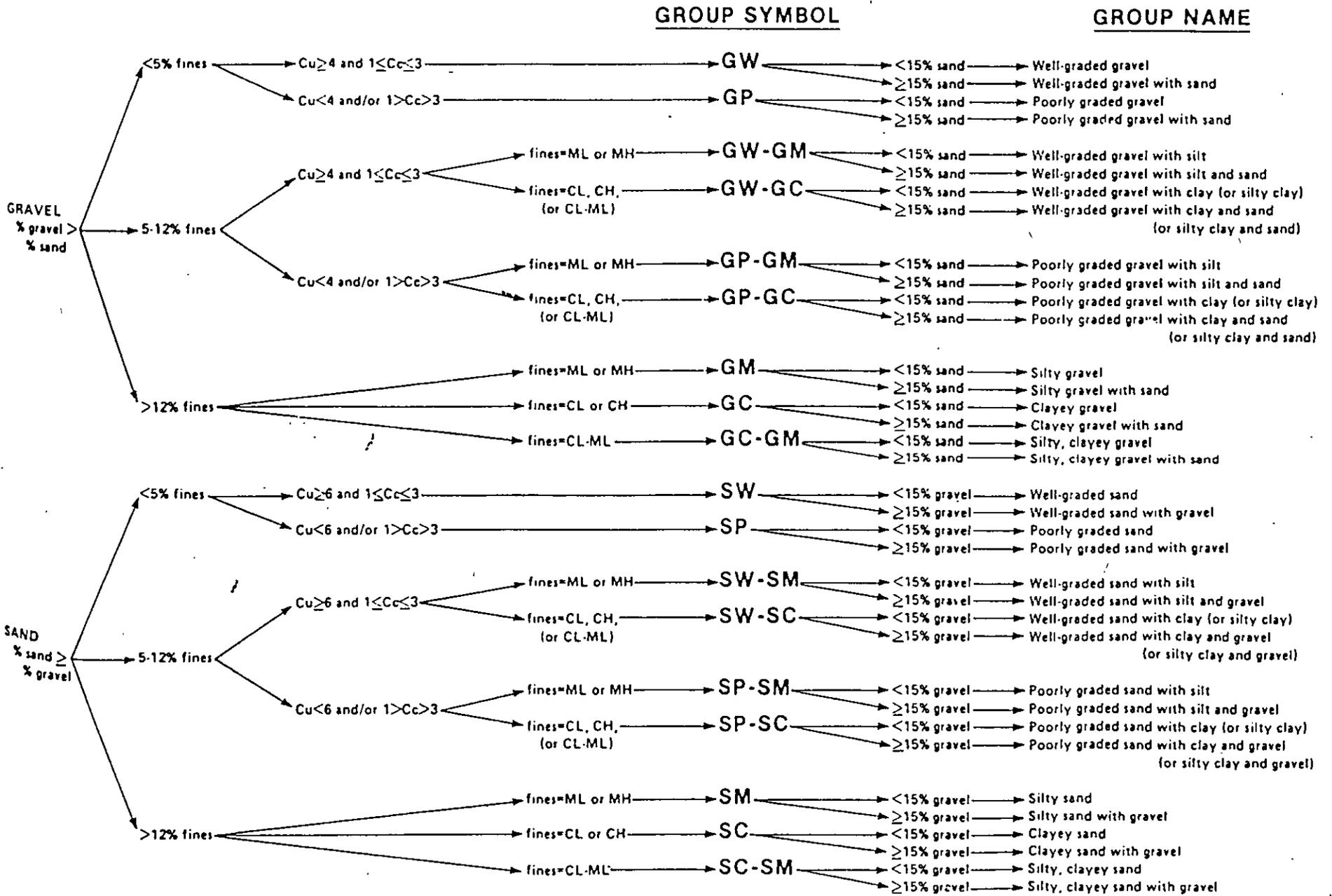


FIG. 2 Flow Chart for Classifying Coarse-Grained Soils (More Than 50 % Retained on No. 200 Sieve)

2/6

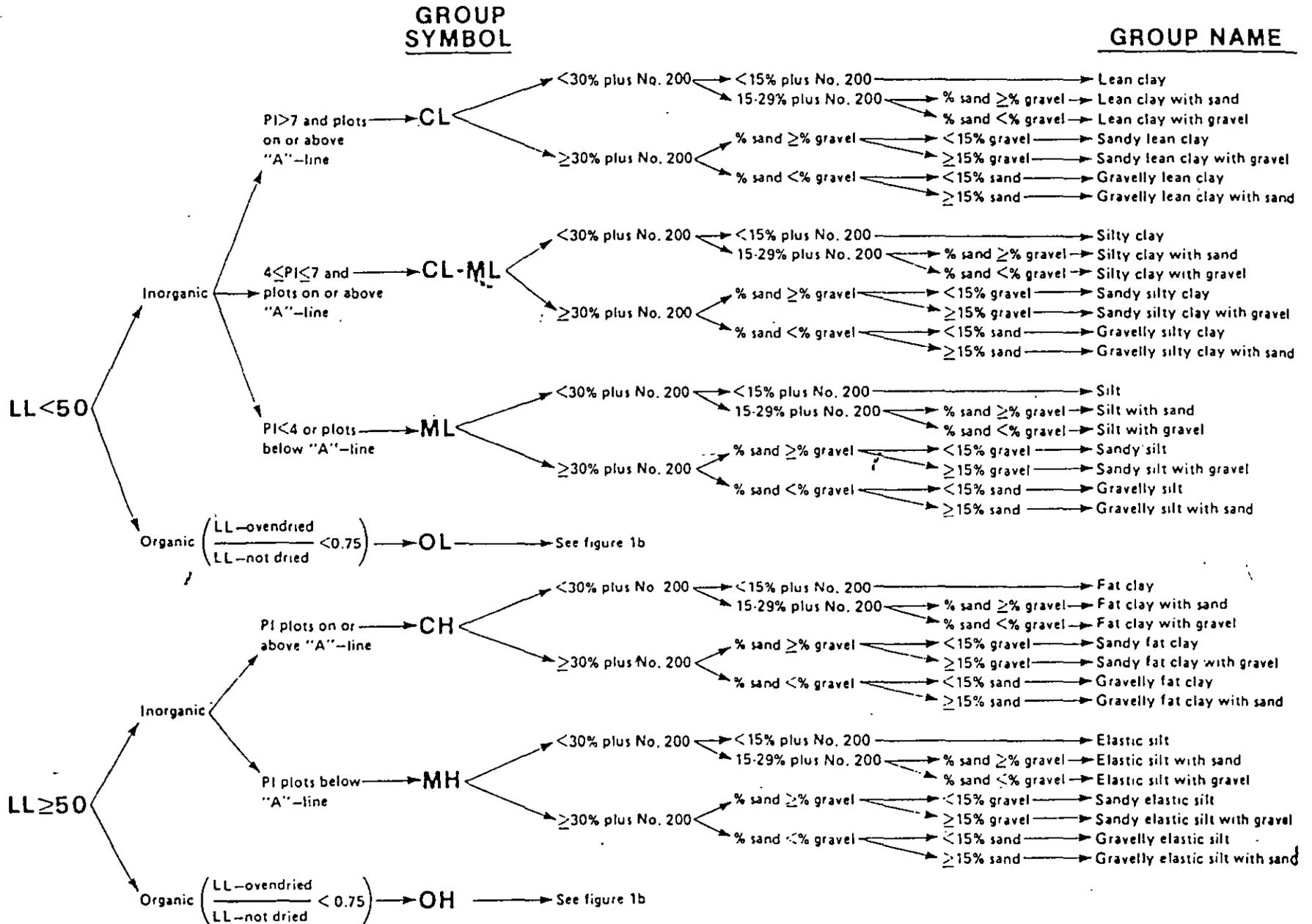


FIG. 1a Flow Chart for Classifying Fine-Grained Soil (50 % or More Passes No. 200 Sieve)

2/6

GROUP SYMBOL

GROUP NAME

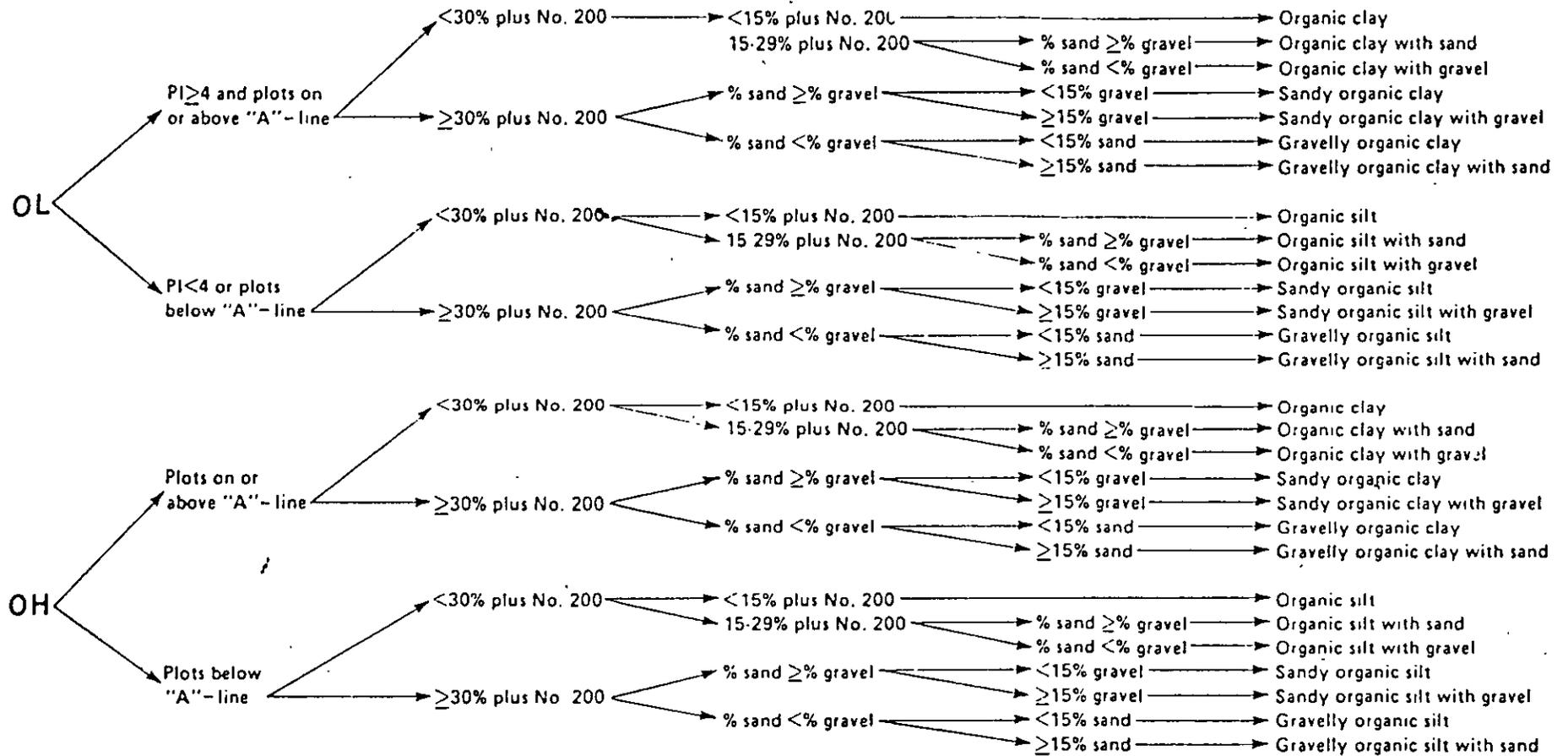


FIG. 1b Flow Chart for Classifying Organic Fine-Grained Soil (50 % or More Passes No. 200 Sieve)

9/1/12

5/16

DIMENSIONS

| | | | | | | | | | | | |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|----|----------------|----------------|----------------|----------------|
| LETTER | A ^Δ | B ^Δ | C ^Δ | E ^Δ | F | G | H | J ^Δ | K ^Δ | L ^Δ | M ^Δ |
| MM | 54 ± 0.5 | 2 ± 0.1 | 27 ± 0.5 | 56 ± 2.0 | 32 | 10 | 16 | 60 ± 1.0 | 50 ± 2.0 | 150 ± 2.0 | 125 ± 2.0 |
| LETTER | N | P | R | T | U ^Δ | V | W | Z | | | |
| MM | 24 | 28 | 24 | 45 | 47 ± 1.0 | 3.8 | 13 | 6.5 | | | |

^Δ ESSENTIAL DIMENSIONS

| CAM ANGLE DEGREES | CAM RADIUS |
|-------------------|------------|
| 0 | 0.742 R |
| 30 | 0.753 R |
| 60 | 0.764 R |
| 90 | 0.773 R |
| 120 | 0.784 R |
| 150 | 0.796 R |
| 180 | 0.818 R |
| 210 | 0.854 R |
| 240 | 0.901 R |
| 270 | 0.945 R |
| 300 | 0.974 R |
| 330 | 0.995 R |
| 360 | 1.000 R |

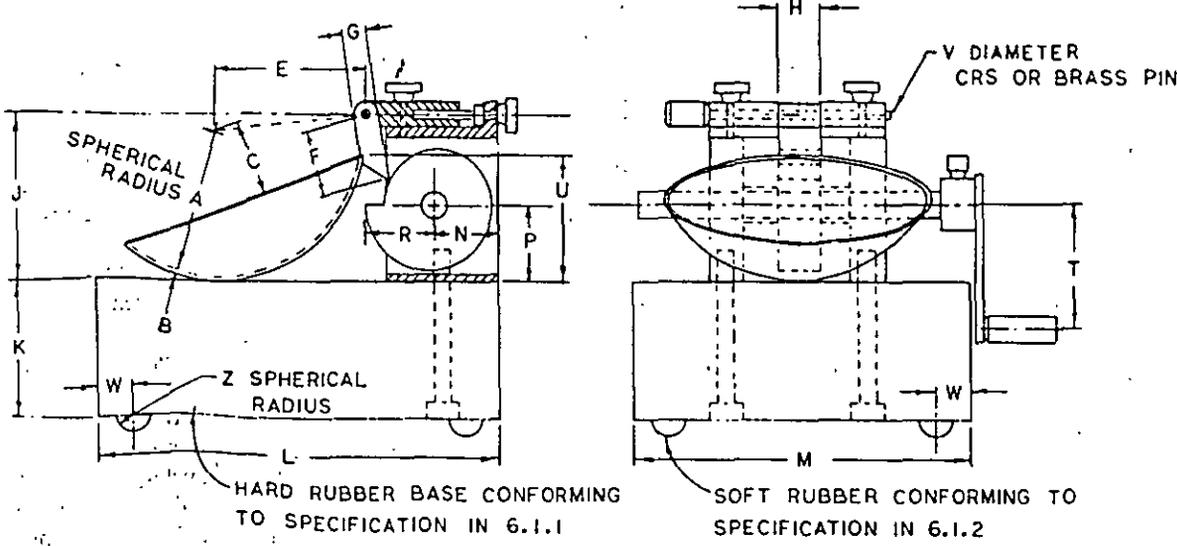


FIG. 1 Hand-Operated Liquid Limit Device

POINT WHERE CUP CONTACTS BASE

HEIGHT GAUGE

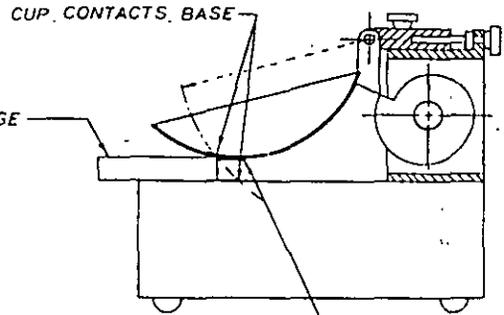


FIG. 4 Calibration for Height of Drop

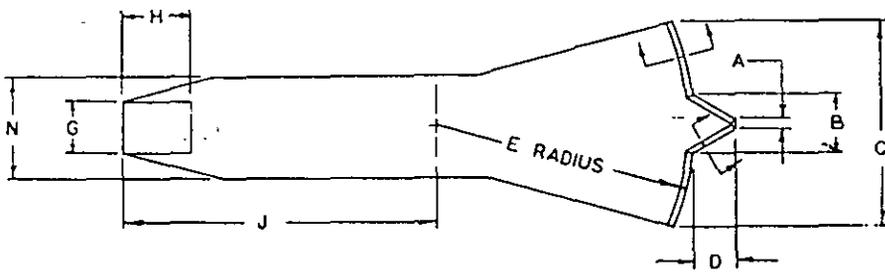
DIMENSIONS

| | | | | | | |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|
| LETTER | A ^Δ | B ^Δ | C ^Δ | D ^Δ | E ^Δ | F ^Δ |
| MM | 2 ± 0.1 | 11 ± 0.2 | 40 ± 0.5 | 8 ± 0.1 | 50 ± 0.5 | 2 ± 0.1 |
| LETTER | G | H | J | K ^Δ | L ^Δ | N |
| MM | 10 MINIMUM | 13 | 60 | 10 ± 0.05 | 60 DEG ± 1 DEG | 20 |

^Δ ESSENTIAL DIMENSIONS

[□] BACK AT LEAST 15 MM FROM TIP

NOTE: DIMENSION A SHOULD BE 1.9-2.0 AND DIMENSION D SHOULD BE 8.0-8.1 WHEN NEW TO ALLOW FOR ADEQUATE SERVICE LIFE



K

F[□]

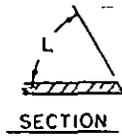
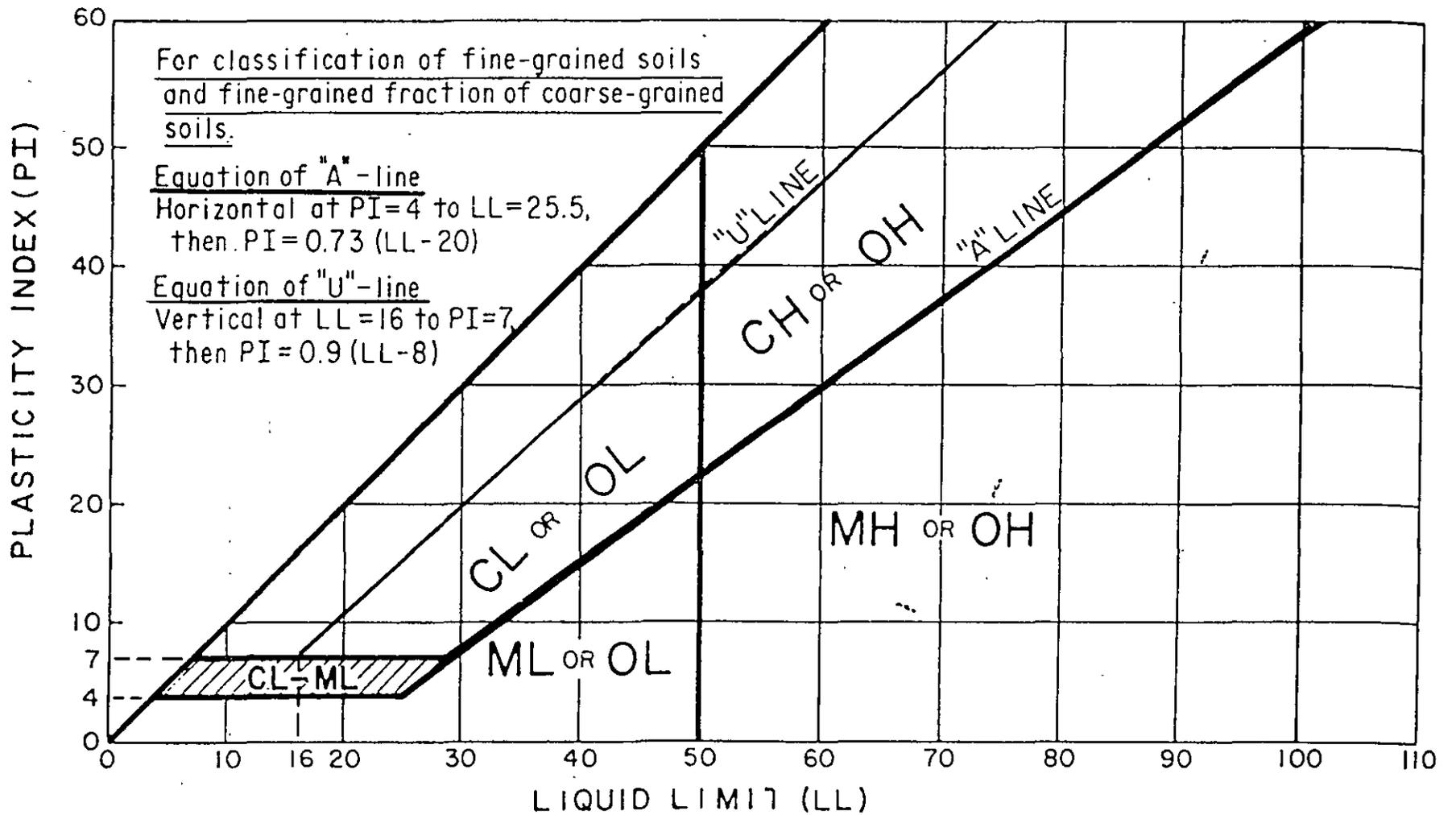


FIG. 2 Grooving Tool (Optional Height-of-Drop Gage Attached)



2/19

TABLE 1 Soil Classification Chart

| Criteria for Assigning Group Symbols and Group Names Using Laboratory Tests ^A | | | | Soil Classification | | |
|--|--|---|---|--|-----------------------------------|----------------------------|
| | | | | Group Symbol | Group Name ^B | |
| Coarse-Grained Soils More than 50 % retained on No. 200 sieve | Gravels More than 50 % of coarse fraction retained on No. 4 sieve | Clean Gravels Less than 5 % fines ^C | $Cu \geq 4$ and $1 \leq Cc \leq 3^E$ | GW | Well-graded gravel ^F | |
| | | Gravels with Fines More than 12 % fines ^C | $Cu < 4$ and/or $1 > Cc > 3^E$ | GP | Poorly graded gravel ^F | |
| | | | Fines classify as ML or MH | GM | Silty gravel ^{F,G,H} | |
| | Sands 50 % or more of coarse fraction passes No. 4 sieve | Clean Sands Less than 5 % fines ^D | Fines classify as CL or CH | GC | Clayey gravel ^{F,G,H} | |
| | | | $Cu \geq 6$ and $1 \leq Cc \leq 3^E$ | SW | Well-graded sand | |
| | | $Cu < 6$ and/or $1 > Cc > 3^E$ | SP | Poorly graded sand ^I | | |
| | | Sands with Fines More than 12 % fines ^D | Fines classify as ML or MH | SM | Silty sand ^{G,H,I} | |
| | | | Fines classify as CL or CH | SC | Clayey sand ^{G,H,I} | |
| | Fine-Grained Soils 50 % or more passes the No. 200 sieve | Silts and Clays Liquid limit less than 50 | inorganic | $PI > 7$ and plots on or above "A" line ^J | CL | Lean clay ^{K,L,M} |
| | | | | $PI < 4$ or plots below "A" line ^J | ML | Silt ^{K,L,M} |
| Silts and Clays Liquid limit 50 or more | | organic | $\frac{\text{Liquid limit - oven dried}}{\text{Liquid limit - not dried}} < 0.75$ | OL | Organic clay ^{K,L,M,N} | |
| | | | | | Organic silt ^{K,L,M,O} | |
| | | inorganic | PI plots on or above "A" line | CH | Fat clay ^{K,L,M} | |
| | | | PI plots below "A" line | MH | Elastic silt ^{K,L,M} | |
| organic | | $\frac{\text{Liquid limit - oven dried}}{\text{Liquid limit - not dried}} < 0.75$ | OH | Organic clay ^{K,L,M,P} | | |
| | | | | Organic silt ^{K,L,M,O} | | |
| Highly organic soils | Primarily organic matter, dark in color, and organic odor | | | PT | Peat | |

^A Based on the material passing the 3-in. (75-mm) sieve.
^B If field sample contained cobbles or boulders, or both, add "with cobbles or boulders, or both" to group name.
^C Gravels with 5 to 12 % fines require dual symbols:
GW-GM well-graded gravel with silt
GW-GC well-graded gravel with clay
GP-GM poorly graded gravel with silt
GP-GC poorly graded gravel with clay
^D Sands with 5 to 12 % fines require dual symbols:
SW-SM well-graded sand with silt
SW-SC well-graded sand with clay
SP-SM poorly graded sand with silt
SP-SC poorly graded sand with clay

$Cu = D_{60}/D_{10}$ $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$
^E If soil contains ≥ 15 % sand, add "with sand" to group name.
^G If fines classify as CL-ML, use dual symbol GC-GM, or SC-SM.
^H If fines are organic, add "with organic fines" to group name.
^I If soil contains ≥ 15 % gravel, add "with gravel" to group name.
^J If Atterberg limits plot in hatched area, soil is a CL-ML, silty clay.
^K If soil contains 15 to 29 % plus No. 200, add "with sand" or "with gravel," whichever is predominant.
^L If soil contains ≥ 30 % plus No. 200, predominantly sand, add "sandy" to group name.

^M If soil contains ≥ 30 % plus No. 200, predominantly gravel, add "gravelly" to group name.
^N $PI \geq 4$ and plots on or above "A" line.
^O $PI < 4$ or plots below "A" line.
^P PI plots on or above "A" line.
^Q PI plots below "A" line.

2/1/9

8/16

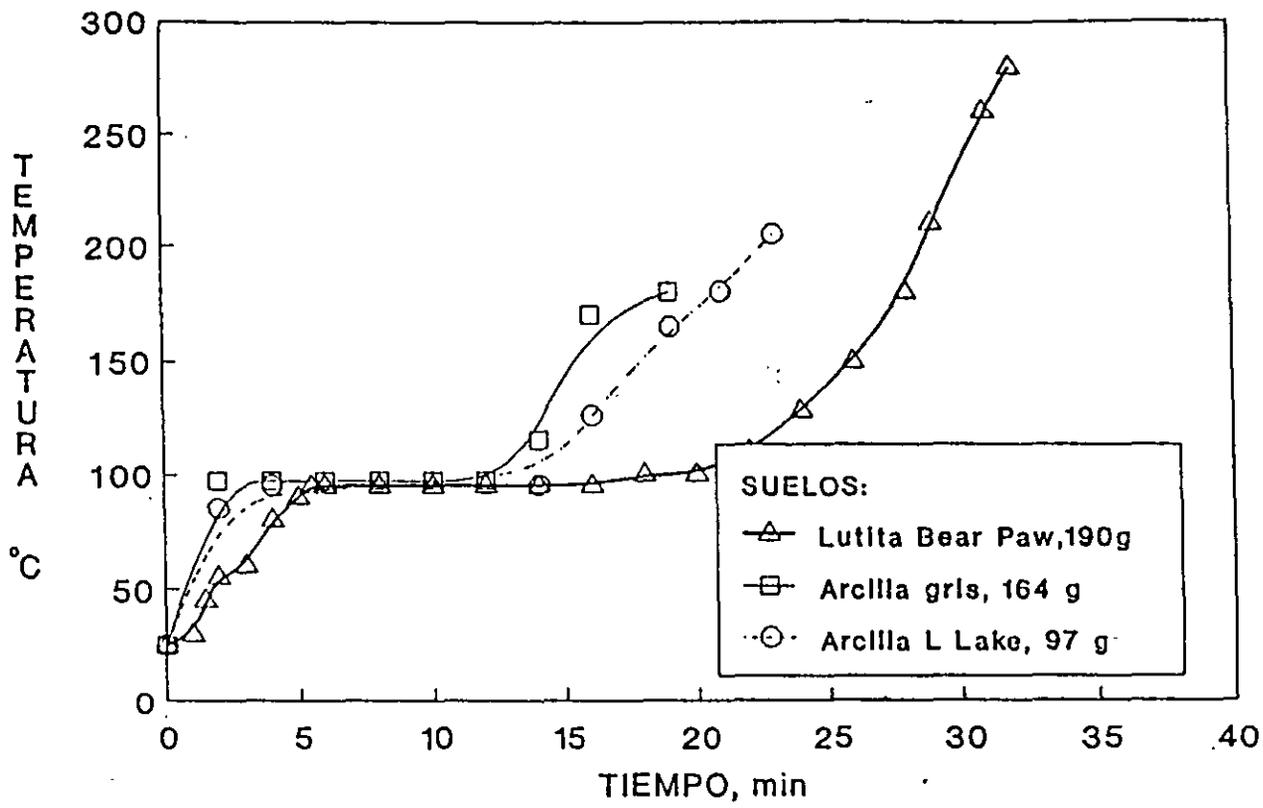


Fig 2.3. Variación de la temperatura con el tiempo, de diversos suelos con el HMO (Charlie, et al, 1982)

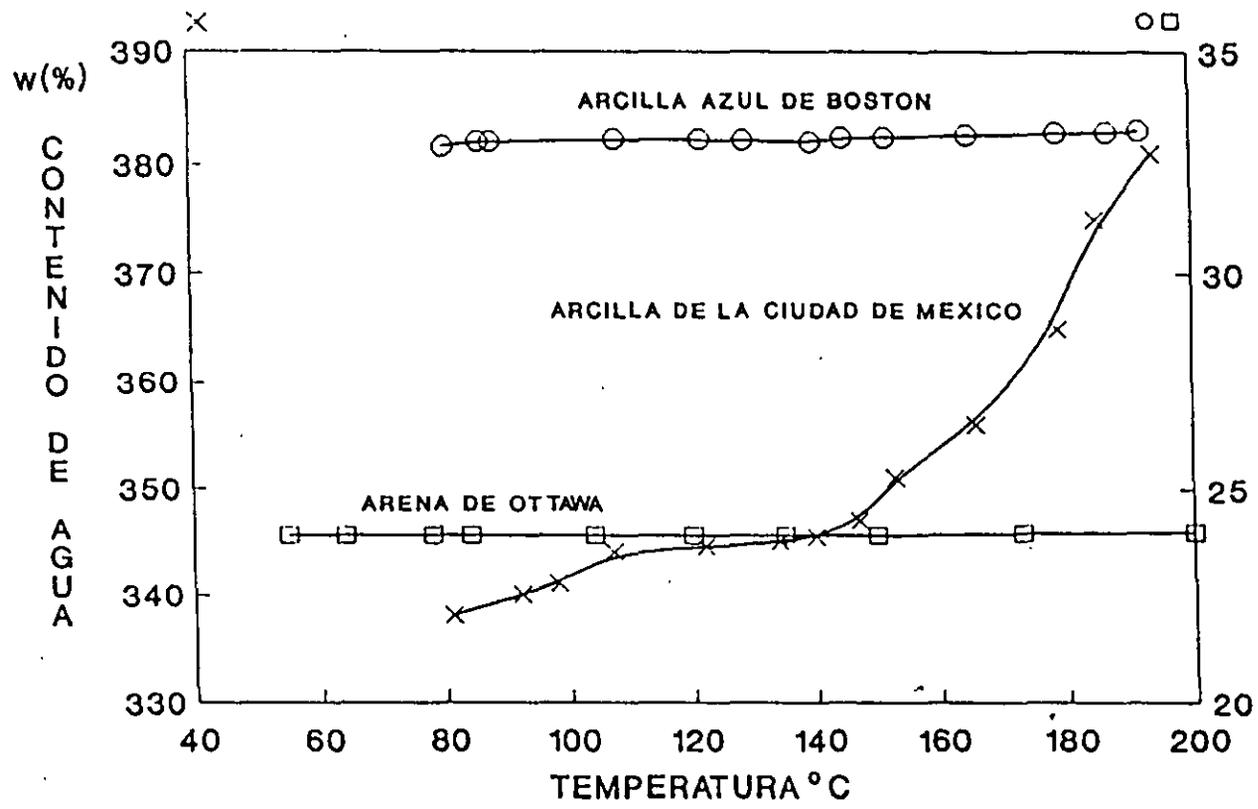


Fig 2.4. Variación del contenido de agua con la temperatura de diversos suelos en el HC (Lambe, 1949)

CONTENIDO DE AGUA, w(%)
MICROONDAS vs CONVECCION

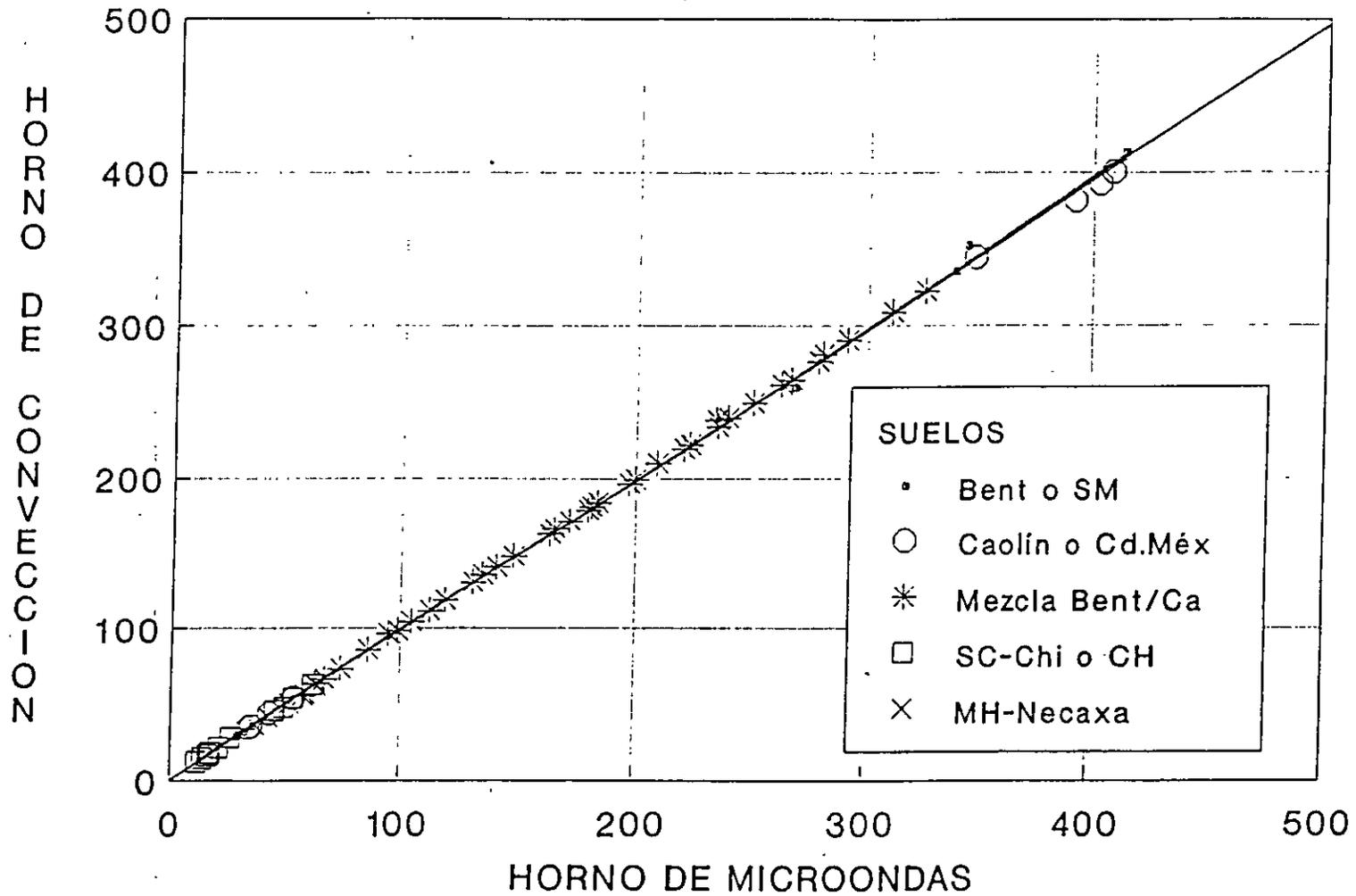


Fig 3.3 Correlación entre los contenidos de agua de diversos suelos, obtenidos con el HMO y el HC

2/6

19/10

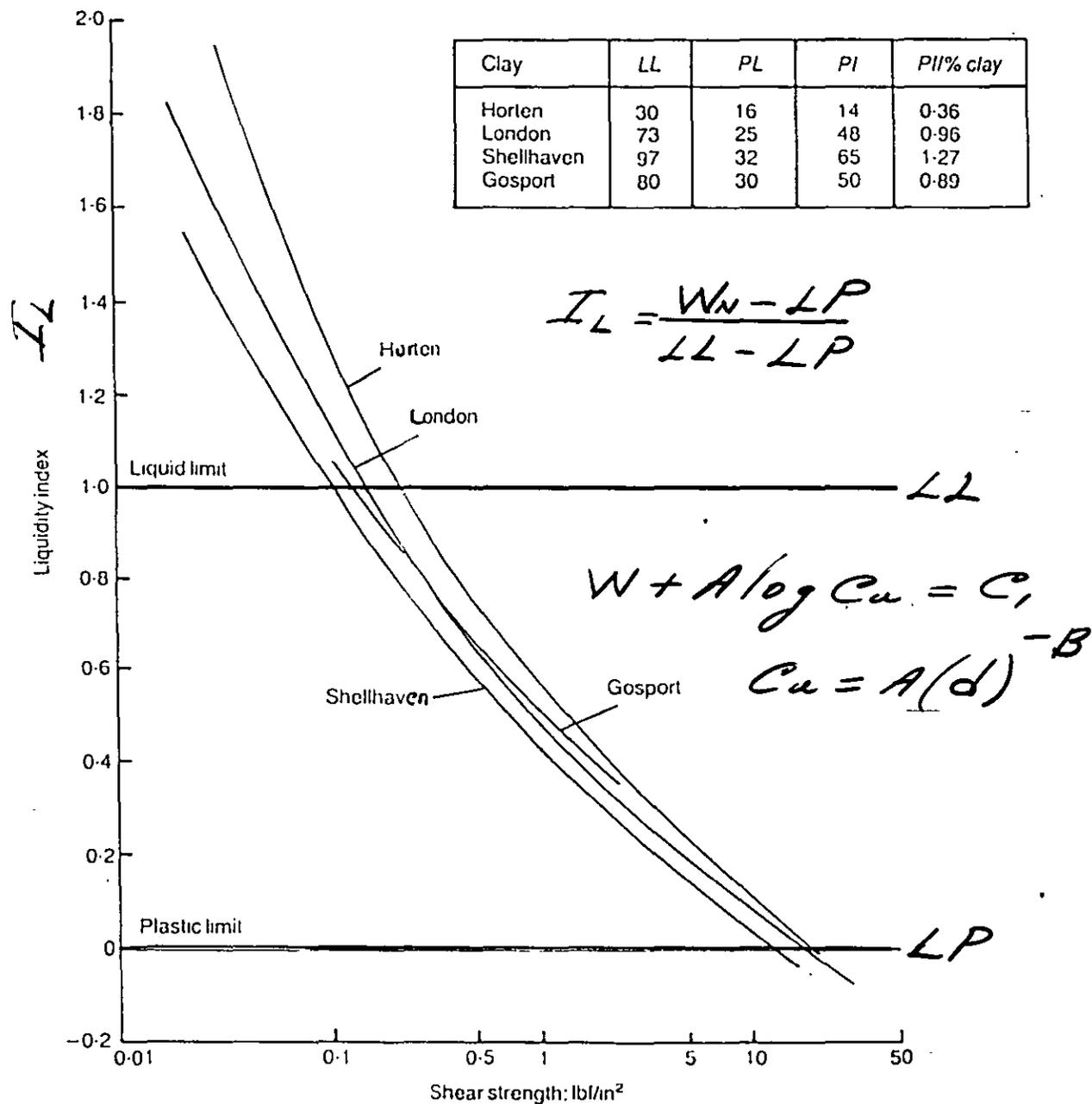


Fig. 1. Relationship between shear strength and liquidity index of remoulded clays (after Skempton & Northey, 1953)

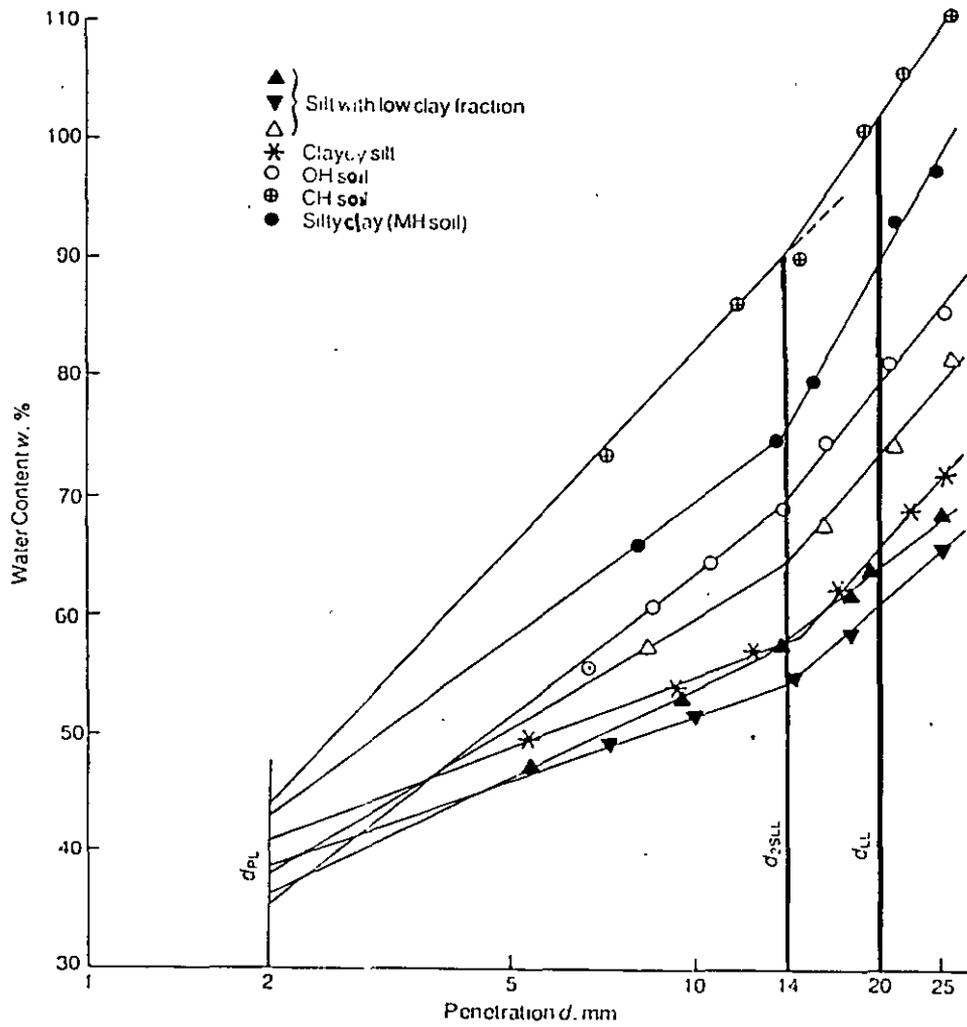


Fig. 4. Experimental results of the relationship between water content and penetration

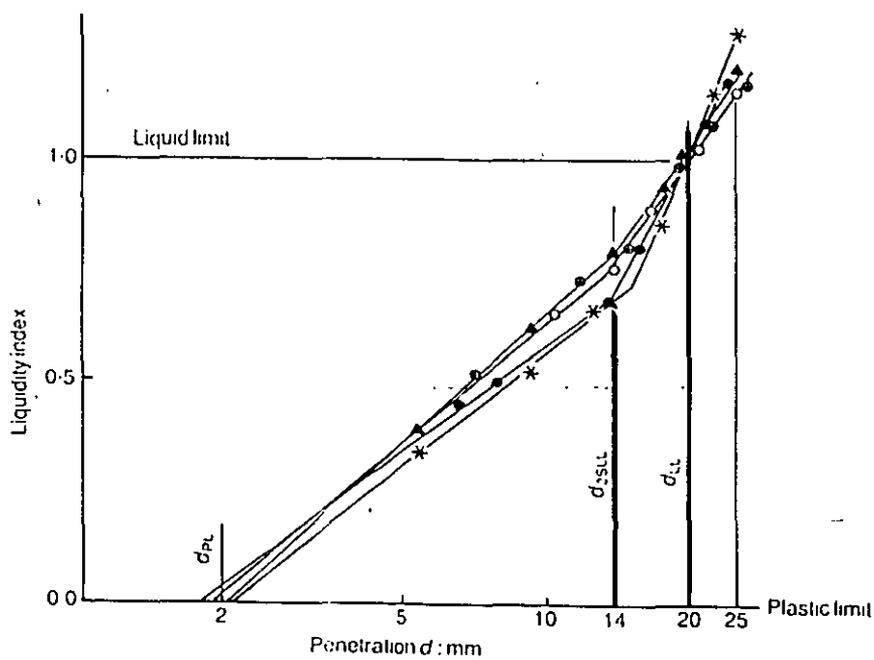


Fig. 5. Experimental results of the relationship between liquidity index and penetration

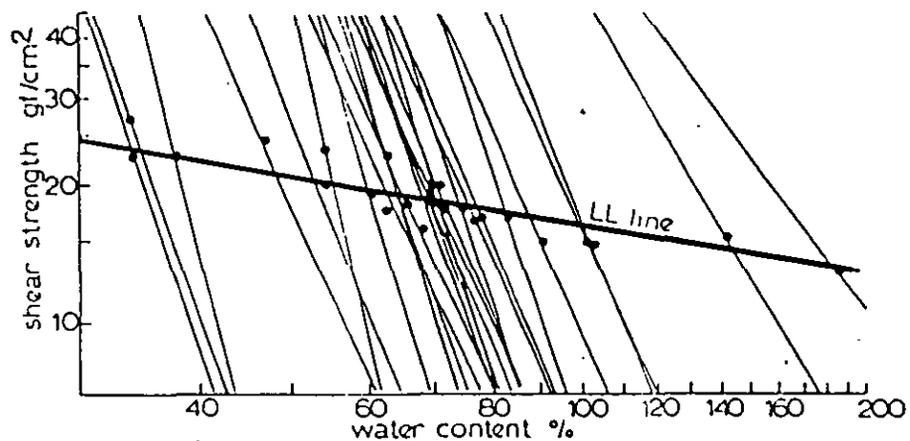


FIG. 2. Relation between water content and shear strength. Each line represents a different soil. The solid points indicate the shear strengths at the liquid limit (after Youssef *et al.* 1965).

Table 1. Characteristics of the methods proposed for the determination of the liquid limit fall cones.

| | Apex angle (°) | Mass of the cone (g) | Depth of penetration at liquid limit (mm) |
|---|-------------------|-------------------------|---|
| <u>USSR cone"</u> (Vasilev 1949) | 30 | 76 | 10.0 |
| <u>Indian cone</u> (Sowers <i>et al.</i> 1959) | 31 | 148 | 25.4 |
| <u>Georgia Institute of Technology cone"</u> (Sowers <i>et al.</i> 1959) | 30 | 75 | 10.0 |
| <u>Swedish cone</u> (Karlsson 1961, 1977) and CAN/BNQ 2501-090-M-86 | 60 | 60 | 10.0 |
| <u>French cone</u> (Leflaive 1971) | 30 | 80 | 17.0 |
| <u>British cone</u> (Sherwood and Ryley 1970; BSI 1975) | 30 | 80 | 20.0 |

"According to Sowers *et al.* (1959), in the methods suggested for the use of former U.S.S.R. and Georgia Institute of Technology cones, the cone is allowed to penetrate the soil slowly until its full weight acts.

13/16

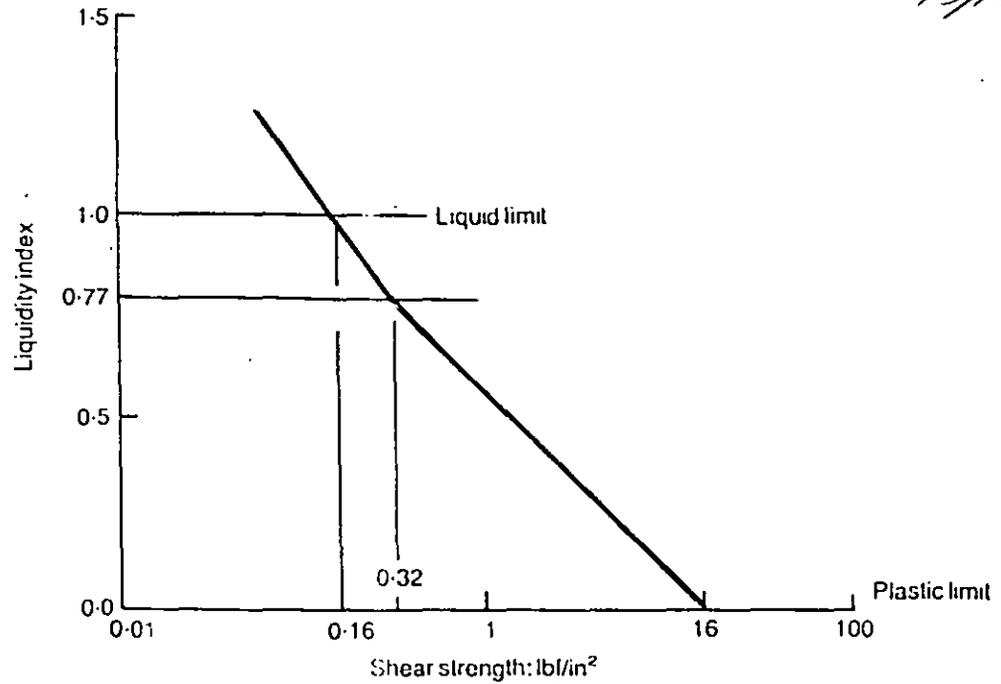


Fig. 2. Idealization of relationship between liquidity index and shear strength

Para un cono de peso W y geometría dada, se tiene: $\frac{C_u d^2}{W} = R$

BS CONE PENETROMETER

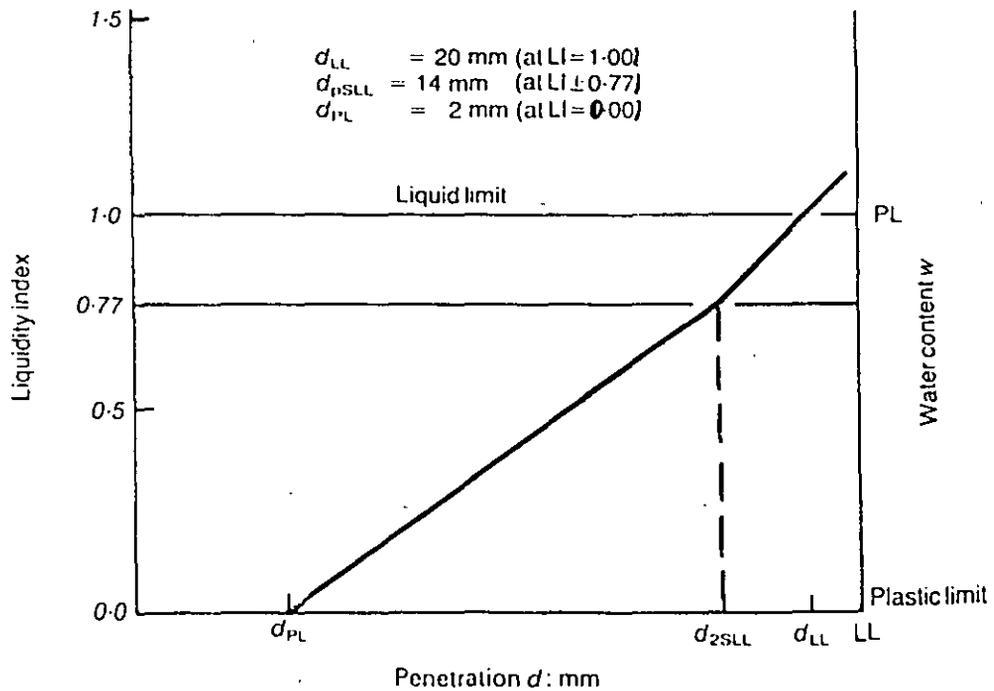


Fig. 3. Relationship between liquidity index, water content and penetration

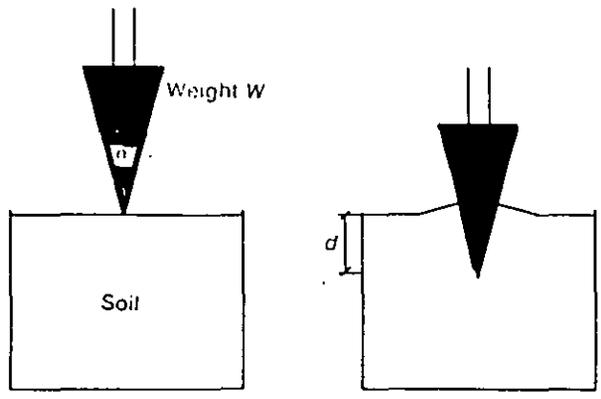


Fig. 1. Diagram of fall-cone test

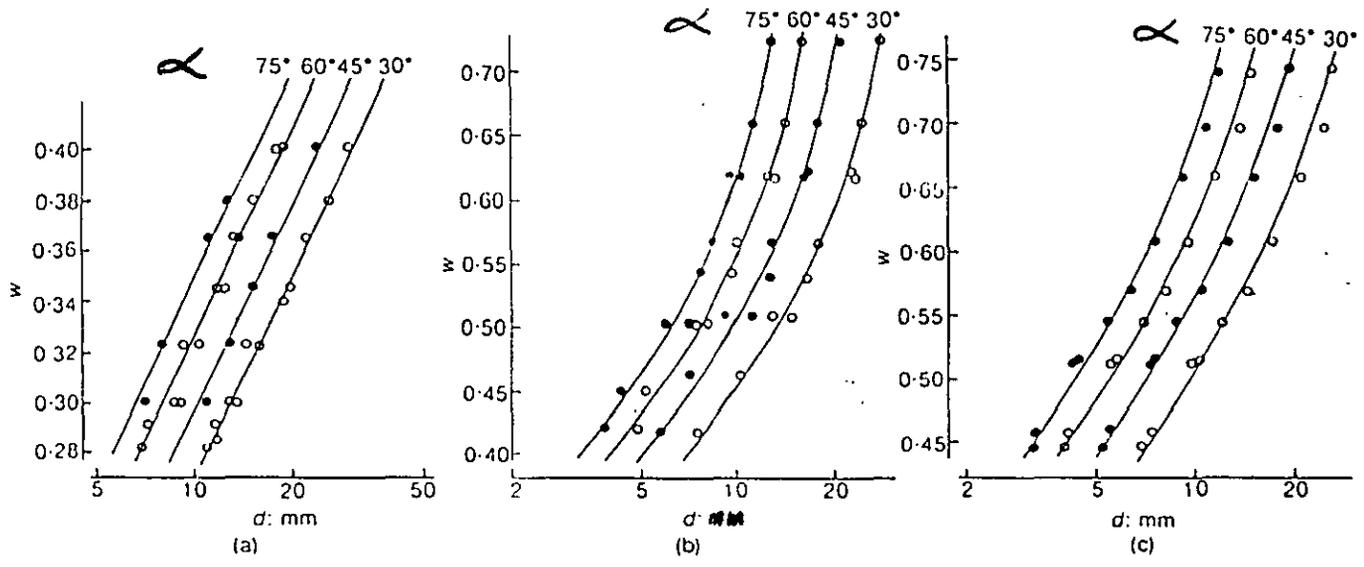


Fig. 2. Variation in penetration d with water content w for cones of weight 100 gf with angles 30°, 45°, 60° and 75°: (a) Drammen Clay; (b) speswhite kaolin; (c) Cambridge Gäult Clay

Fig. 1. Relationship between the depths of penetration of the 60° - 60 g and 30° - 80 g fall cones.

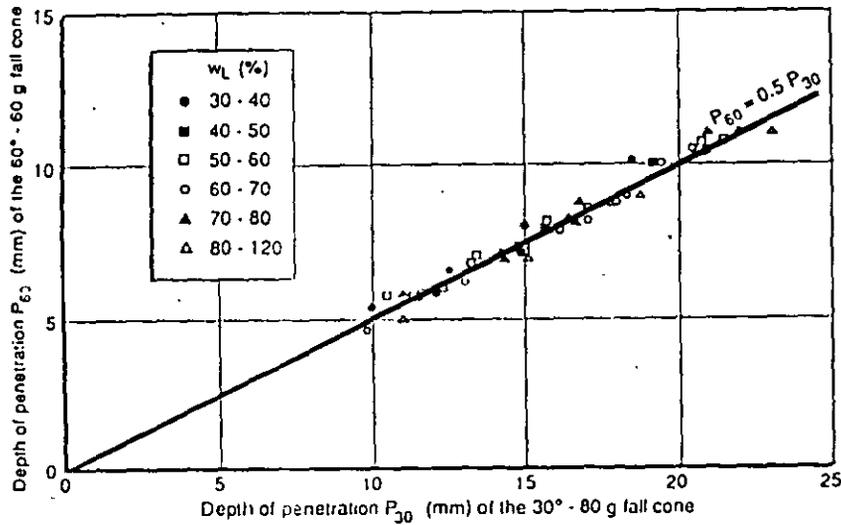
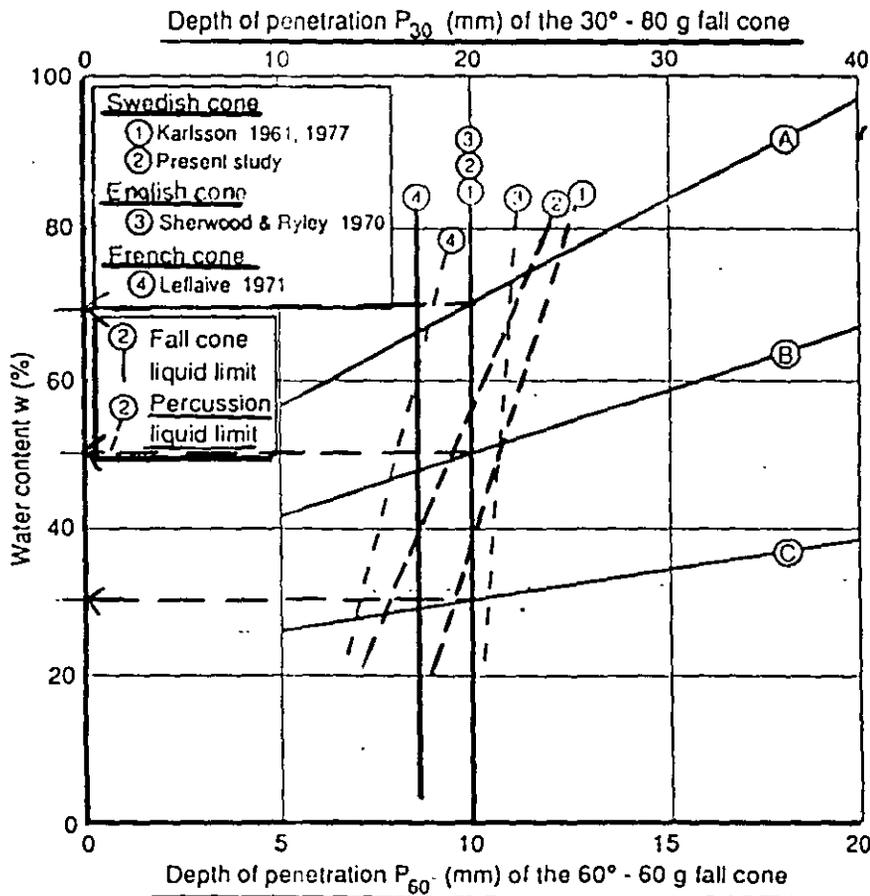
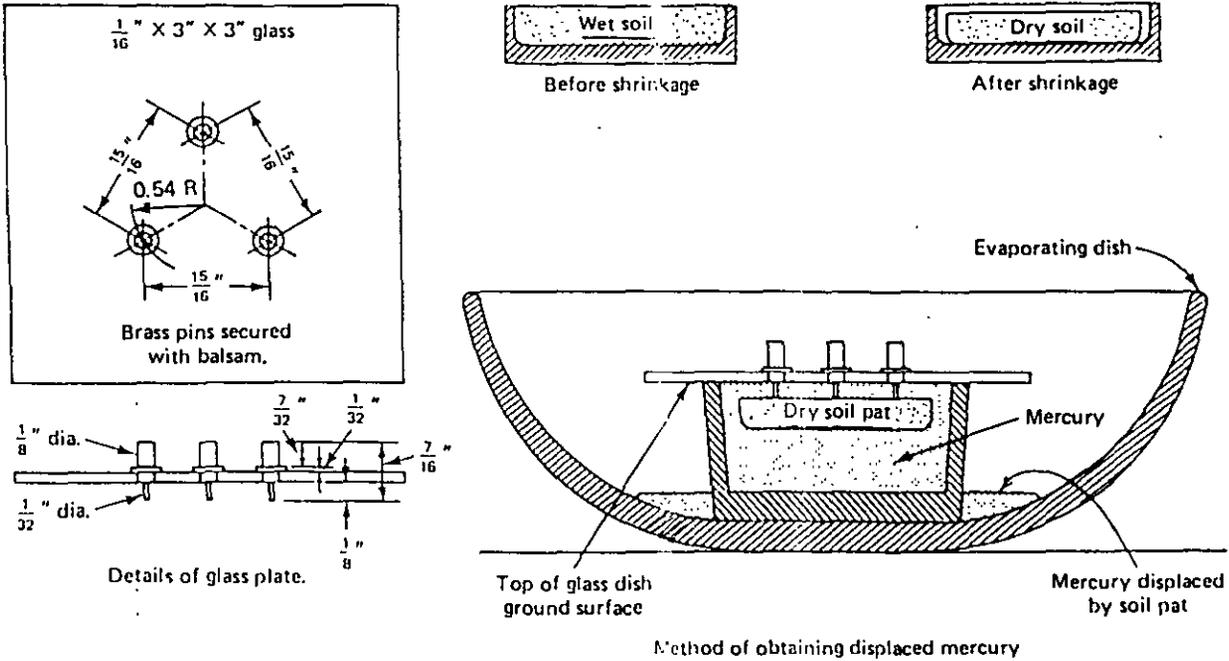


Fig. 5. Liquid limits determined by different fall cone and percussion methods.





Metric equivalents

| | | | | | | | |
|-----|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|-----------------|------|
| in. | $\frac{1}{32}$ | $\frac{1}{16}$ | $\frac{1}{8}$ | $\frac{2}{32}$ | $\frac{2}{16}$ | $\frac{15}{16}$ | 3 |
| mm | 0.8 | 1.6 | 3.2 | 5.6 | 11.1 | 23.8 | 76.2 |

FIGURE 8-1 Apparatus for Determining the Volumetric Change of Subgrade Soils [1].

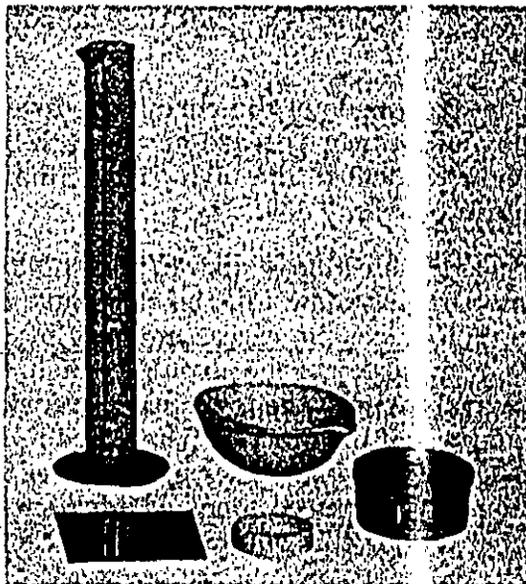


FIGURE 8-2 Apparatus for Determining Shrinkage Limit (Courtesy of Soiltest, Inc.)



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS I

TEMA

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS
FINOS MEDIANTE HIDRÓMETRO**



**CONFERENCISTA
DR. RIGOBERTO RIVERA CONSTANTINO
PALACIO DE MINERÍA
MAYO 2000**

ANALISIS GRANULOMETRICO DE SUELOS FINOS MEDIANTE HIDROMETRO

Rigoberto Rivera Constantino, Profesor Titular,
DICTyG, DEP, Facultad de Ingeniería, UNAM.

1. GENERALIDADES

El análisis granulométrico de un suelo mediante la técnica del hidrómetro es aplicable a partículas cuyo diámetro es inferior a 75μ . Dicho análisis se apoya en la Ley de Stokes, la cual establece la relación entre el diámetro de una partícula esférica que se sedimenta en un medio líquido y su velocidad de sedimentación.

2. EQUIPO Y MATERIALES

- 2.1 Hidrómetro aerodinámico, calibrado para leer densidades de 0.995 a 1.04 (hidrómetro 151H, Especificaciones de la ASTM, E100) o bien hidrómetro Bouyoucos graduado de 0 a 60 gr de sólidos por litro (152H). Este último está calibrado para leer gramos de suelo con un peso específico relativo $G_s=2.65$, en un volumen de 1000 cm^3 de suspensión, siempre y cuando no haya más de 60 gr de suelo en la misma.
- 2.2 Dos probetas de 1000 cm^3 cada una, una de ellas únicamente con marca de aforo y sin vertedero.
- 2.3 Mezclador mecánico.
- 2.4 Termómetro que pueda medir de 0 a 50° C , con resolución de 0.5° C .
- 2.5 Cronógrafo
- 2.6 Desecador
- 2.7 Varios: espátula, gotero o pipeta, regla graduada en cm, vernier, piceta, agua estilada, cápsula de 100 cm^3 , cápsula de 400 cm^3 , toallas de papel, agente defloculante.

3. PROCEDIMIENTO

Calibración del hidrómetro

- 3.1 Es necesario verificar que la escala de los hidrómetros graduados directamente en densidad no se haya desplazado, con respecto al vástago del hidrómetro. En el caso de hidrómetros graduados en gr/lit , debe hacerse la conversión a escala de densidad, con el fin de utilizar los nomogramas existentes.
- 3.2 Para esta calibración se preparan soluciones de una sal soluble (sal de mesa), de concentraciones conocidas y se observan las lecturas del hidrómetro en cada una de las soluciones. Se pueden utilizar soluciones de 20, 30 y 40 gr de sal por cada 1000 cm^3 de solución. Es suficiente con preparar 500 cm^3 de solución con cada una de las concentraciones indicadas para fines de calibración.
- 3.3 Se verifica el volumen de un matraz aforado de 500 cm^3 , llenándolo hasta la marca de aforo con agua destilada y pesándolo en la balanza con capacidad de 800 gr. El volumen se obtiene dividiendo el peso del agua en el matraz entre el peso específico

del agua, a la temperatura a que se realice la determinación. Se calculan las densidades de las tres soluciones y se transfieren a tres probetas de 500 cm³ para llevar a cabo la calibración.

- 3.4 Se introduce el hidrómetro en cada una de las probetas conteniendo las soluciones de concentración conocida, y se registran las lecturas observadas bajo menisco. En caso de que la temperatura de las tres soluciones difiera de la temperatura del agua con la que originalmente se determinó el volumen del matraz, deberá hacerse una corrección por temperatura.

Desarrollo de la prueba durante los primeros dos minutos

- 3.5 Durante los dos primeros minutos de la prueba el hidrómetro permanece dentro de la suspensión de suelo que se está sedimentando. En este lapso, la altura real de caída de las partículas de suelo H_r se mide a partir de la superficie de la suspensión hasta el centro de flotación del hidrómetro. Para cada lectura R_H , esta altura de caída se obtiene calibrando el hidrómetro de antemano de la manera siguiente:
- 3.6 Mida la distancia H_1 del cuello del bulbo del hidrómetro hasta las principales marcas de calibración (10 gr, 20, 30, 40, 50, y 60 gr/lit) en el vástago del hidrómetro (o bien 1.000, 1.005, 1.010, etc.). Use un compás de puntas para esta operación.
- 3.7 Mida la distancia h del cuello a la punta del bulbo del hidrómetro (usar un calibrador para este fin).
- 3.8 Determine la altura de caída verdadera H'_r , correspondiente a cada una de las principales marcas de calibración (R_H), usando la expresión siguiente:

$$H'_r = H_1 + \frac{h}{2} \dots (3.1)$$

Después de la lectura de dos minutos se extrae el hidrómetro de la suspensión

Desarrollo de la prueba después de la lectura de dos minutos

- 3.9 Para todas las lecturas subsecuentes (R_H), el hidrómetro se introduce en la suspensión inmediatamente antes de hacer cada lectura y se remueve en seguida. Durante la inserción, la superficie de la suspensión se eleva, provocando con esto que la altura real de caída sea menor que la calculada. Para determinar la altura real de caída se usa la siguiente expresión:

$$H_r = H_1 + \frac{1}{2} \left(h - \frac{V}{A} \right) \dots (3.2)$$

donde:

V: volumen del bulbo del hidrómetro

A: área de la sección transversal de la probeta de sedimentación

Para determinar los valores de V y de A, se procede como sigue:

- a) Pese el hidrómetro en la balanza de 800 gr.
- b) Calcule el volumen V del bulbo del hidrómetro, suponiendo que la densidad del hidrómetro es unitaria y que el volumen del vástago es despreciable.
- c) Para calcular el valor de A, mida la distancia entre dos graduaciones (por ejemplo 400 y 900 cm^3) de la probeta Bouyoucos de 1000 cm^3 de capacidad que se va a utilizar para el análisis por hidrómetro. El valor de A será igual a la diferencia de volúmenes dividida entre la distancia involucrada.
- d) Una vez determinados los valores de V y de A, se calculan las alturas verdaderas de caída, correspondientes a cada una de las principales marcas de calibración (R_H), utilizando la expresión anterior.

4. CORRECCIONES

Corrección por temperatura (C_T). La mayoría de los hidrómetros están calibrados para dar una lectura de 1.000 o de cero, en el agua destilada a una temperatura de 20 °C. Si durante la prueba la temperatura no se mantiene a 20 °C, es necesario corregir las lecturas realizadas. Para ello se procede como sigue:

- a) Llene de agua destilada dos probetas de 1000 cm^3 de capacidad. Lleve una de las probetas hasta una temperatura de 10 °C, y la otra a 30 °C, cuidando que dicha temperatura sea uniforme en toda la masa de agua.
- b) Se toman lecturas del hidrómetro, correspondientes al plano de la superficie del agua, para variaciones de temperatura de 0.5 °C, hasta que las dos probetas alcancen la temperatura ambiente.
- c) Se lleva un registro de la temperatura de prueba y lecturas del hidrómetro. Esta corrección es positiva para temperaturas mayores de 20 °C o negativa en caso contrario.

Corrección por menisco (C_m). Limpie el vástago del hidrómetro cuidadosamente con jabón y agua. Coloque el hidrómetro en una probeta con agua destilada. La corrección por menisco, en cm, es igual a la diferencia entre la lectura en el hidrómetro a nivel del plano de la superficie del agua y la lectura en el mismo hidrómetro correspondiente al extremo superior del menisco (donde se harán las lecturas en la suspensión agua-suelo). Esta corrección es positiva.

Corrección por defloculante (C_d). Vacíe una cierta cantidad de agua destilada en una probeta de 1000 cm^3 de capacidad y agregue la cantidad de defloculante que vaya emplearse en el análisis con hidrómetro. En seguida adicione agua destilada hasta la marca de 1000 cm^3 , y agite la solución para que se uniformice. Tome una lectura con el hidrómetro en esta solución. La lectura del hidrómetro en agua destilada menos la

lectura en la mezcla agua-defloculante es igual a la corrección buscada. Esta corrección es negativa.

Los defloculantes más utilizados en esta prueba son el hexa-metafosfato de sodio en suelos alcalinos, y el silicato de sodio en suelos ácidos, cuyo pH es menor de 7. Tomando en cuenta que la mayoría de las arcillas son alcalinas, es común usar en la prueba del hidrómetro un volumen de solución de 125 cm³, al 4 ó 5% de hexametáfosfato de sodio, en los 1000 cm³ de la probeta de ensaye. La cantidad exacta de defloculante deberá determinarse por ensayo y error,

5. ANÁLISIS CON HIDROMETRO DE UN SUELO COHESIVO

- 5.1) Pese una cantidad de suelo húmedo (en el caso de suelos cohesivos no se debe secar el material previamente, ya sea al aire o al horno) que contenga aproximadamente 50 gr de sólidos.
- 5.2) Agregue en 300 cm³ de agua destilada la cantidad total de defloculante que se empleará en la suspensión de 1000 cm³.
- 5.3) Adicione un poco de esta solución al suelo y mezcle con una espátula hasta obtener la consistencia de una pasta fluida.
- 5.4) Transfiera esta pasta a un mezclador mecánico y agregue el resto de la solución preparada en el inciso 5.2 (en el caso de un material muy plástico es conveniente dejar reposando la suspensión con el defloculante de un día para otro.
- 5.5) Mezcle la suspensión suelo-agua durante 15 min como mínimo.
- 5.6) Transfiera la suspensión suelo-agua a una probeta de 1000 cm³ (escurra con la piceta el suelo que se adhiera al vaso de la mezcladora) y agregue suficiente agua destilada hasta alcanzar la marca de 1000 cm³.
- 5.7) Mida la temperatura de la suspensión con precisión de 0.5 °C.
- 5.8) Cierre la boca de la probeta con la mano y agite vigorosamente por un período mínimo de un minuto, haciéndola girar 180° en un plano vertical.
- 5.9) Inmediatamente después de la agitación, coloque cuidadosamente la probeta sobre una mesa firme. Se toma como tiempo de iniciación de la sedimentación, el momento en que se coloca la probeta sobre la mesa, debiéndose arrancar en ese momento el cronógrafo (la probeta no deberá estar cerca de alguna fuente de calor, tal como un horno, radiador o la luz directa del sol, evítese también la vecindad de una ventana abierta). Opcionalmente puede emplearse un baño a temperatura constante para la realización de esta prueba.
- 5.10) Inserte el hidrómetro lenta y cuidadosamente hasta una profundidad ligeramente mayor que la de flotación y permítase al hidrómetro flotar libremente.

- 5.11) Deje al hidrómetro en la suspensión durante los primeros dos minutos y háganse lecturas a los tiempos de 0.5, 1, y 2 min. Retírese el hidrómetro de la suspensión después de la lectura de los 2 min.
- 5.12) Repítanse los pasos (5.8) a (5.11) hasta que se obtenga un juego consistente de lecturas para los 2 primeros minutos.
- 5.13) Reinicie la prueba como se indica en los puntos (5.8) y (5.9) e inserte el hidrómetro únicamente para realizar la lectura de 2 min. Retire el hidrómetro posteriormente.
- 5.14) Inserte nuevamente el hidrómetro 5 seg antes de realizar las lecturas a los tiempos de 4, 15, 30 min 1 h, 2, 4, 8, y posteriormente una o dos veces al día. No es conveniente prolongar la prueba del hidrómetro por más de 24 h, ya que para tamaños de partículas inferiores a 0.5 micras, el fenómeno de sedimentación se ve grandemente influenciado por el movimiento Browniano.
- 5.15) Cuando no se estén haciendo lecturas con el hidrómetro, éste deberá permanecer inmerso en una probeta llena de agua limpia. Antes de inmergir el hidrómetro en la suspensión suelo-agua, deberá limpiarse el vástago cuidadosamente con un papel absorbente. Mantenga tapadas ambas probetas para evitar evaporación y depósito de polvo.
- 5.16) Mida la temperatura de la suspensión con precisión de 0.5 °C, después de realizar cada lectura con el hidrómetro, empezando con la lectura a los 15 minutos de iniciada la prueba.
- 5.17) Después de la última lectura, agite vigorosamente la probeta para poner nuevamente en movimiento los sedimentos en suspensión. Calcule el peso seco de los sólidos más el defloculante; restando el peso de este último se obtiene el peso seco de los sólidos.
- 5.18) Calcule y dibuje los puntos correspondientes a la curva granulométrica, como se indica a continuación.

6. CALCULOS

Porcentaje de partículas sólidas menores que un cierto diámetro

En el instante t , y a la profundidad H_r , a la cual se realiza una lectura R_H en el hidrómetro, no existen partículas de suelo superiores a un cierto diámetro D , ya que su sedimentación se produce a mayor velocidad. Por otra parte, al mismo tiempo t , la concentración de la suspensión en partículas de diámetros inferiores o iguales a D , a la profundidad H_r , es la misma que al inicio de la prueba.

El porcentaje de suelo (p) en suspensión que se tiene a la profundidad H_r para un hidrómetro graduado en densidad, se calcula como:

$$p = \left[\left(\frac{V}{W_s} \right) \frac{\gamma_s \gamma_w}{(\gamma_s - 1)} \right] \frac{R}{10} \dots (5.1)$$

donde:

V: volumen de la suspensión, en cm³

W_s: peso de las partículas sólidas, en gr.

γ_s: peso específico de los granos sólidos, en gr/cm³.

γ_w: peso específico del agua, en gr/cm³.

R: lectura corregida (C_m ± C_T - C_d) hidrómetro

Para un hidrómetro calibrado en gr/lt, el porcentaje de suelo se calcula como:

$$p = \frac{Ra}{W_s} (100) \dots (5.2)$$

siendo $a = \frac{1.65G_s}{2.65(G_s - 1)}$; en esta última ecuación G_s es el peso específico relativo de los sólidos o gravedad específica.

Diámetro equivalente de partículas de suelo

Para un tiempo t, después del inicio de la sedimentación, el diámetro equivalente de las partículas de suelo, que caen desde la superficie de la suspensión hasta la profundidad H_r, puede calcularse con base en la ley de Stokes, esto es:

$$D = \sqrt{\frac{30\eta}{g(\gamma_s - \gamma_w)} \frac{H_r'}{t}} \dots (5.3)$$

donde:

η: viscosidad dinámica del fluido en gr/cm-seg.

g: aceleración de la gravedad en cm/seg².

γ_s: peso específico de las partículas sólidas, en gr/cm³.

γ_w: peso específico del fluido, en gr/cm³

H_r': altura de caída real de las partículas de suelo, corregida únicamente por menisco, en cm.

t: tiempo en min.

D: diámetro de las partículas de suelo, en mm.

Si en la formula anterior hacemos $K = \sqrt{\frac{30\eta}{g(\gamma_s - \gamma_w)}}$, el diámetro D se puede expresar como:

$$D = K \sqrt{\frac{H_r'}{t}} \dots (5.4)$$

El valor de K puede ser evaluado por separado, tal como se muestra en la tabla anexa, con lo cual se facilita la determinación de los valores de D.

Tabla 6.1 Valores de K

| Temperatura, °C | Peso específico relativo de los sólidos (G_s) | | | | | | | | |
|--------------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 2.45 | 2.50 | 2.55 | 2.60 | 2.65 | 2.70 | 2.75 | 2.80 | 2.85 |
| 16 | 0.01510 | 0.01505 | 0.01481 | 0.01457 | 0.01435 | 0.01414 | 0.01394 | 0.01374 | 0.01356 |
| 17 | 0.01511 | 0.01486 | 0.01462 | 0.01439 | 0.01417 | 0.01396 | 0.01376 | 0.01356 | 0.01338 |
| 18 | 0.01492 | 0.01467 | 0.01443 | 0.01421 | 0.01399 | 0.01378 | 0.01359 | 0.01339 | 0.01321 |
| 19 | 0.01474 | 0.01449 | 0.01425 | 0.01403 | 0.01382 | 0.01361 | 0.01342 | 0.01323 | 0.01305 |
| 20 | 0.01456 | 0.01431 | 0.01408 | 0.01386 | 0.01365 | 0.01344 | 0.01325 | 0.01307 | 0.01289 |
| 21 | 0.01438 | 0.01414 | 0.01391 | 0.01369 | 0.01348 | 0.01328 | 0.01309 | 0.01291 | 0.01273 |
| 22 | 0.01421 | 0.01397 | 0.01374 | 0.01353 | 0.01332 | 0.01312 | 0.01294 | 0.01276 | 0.01258 |
| 23 | 0.01404 | 0.01381 | 0.01358 | 0.01337 | 0.01317 | 0.01297 | 0.01279 | 0.01261 | 0.01243 |
| 24 | 0.01388 | 0.01365 | 0.01342 | 0.01321 | 0.01301 | 0.01282 | 0.01264 | 0.01246 | 0.01229 |
| 25 | 0.01372 | 0.01349 | 0.01327 | 0.01306 | 0.01286 | 0.01267 | 0.01249 | 0.01232 | 0.01215 |
| 26 | 0.01357 | 0.01334 | 0.01312 | 0.01291 | 0.01272 | 0.01253 | 0.01235 | 0.01218 | 0.01201 |
| 27 | 0.01342 | 0.01319 | 0.01297 | 0.01277 | 0.01258 | 0.01239 | 0.01221 | 0.01204 | 0.01188 |
| 28 | 0.01327 | 0.01304 | 0.01283 | 0.01264 | 0.01244 | 0.01225 | 0.01208 | 0.01191 | 0.01175 |
| 29 | 0.01312 | 0.01290 | 0.01269 | 0.01249 | 0.01230 | 0.01212 | 0.01195 | 0.01178 | 0.01162 |
| 30 | 0.01298 | 0.01276 | 0.01256 | 0.01236 | 0.01217 | 0.01199 | 0.01182 | 0.01165 | 0.01149 |

7. POSIBLES ERRORES

- 7.1 Utilización de un agente dispersor inadecuado o de una concentración no conveniente.
- 7.2 Dispersión incompleta del suelo al comienzo de la etapa de sedimentación.
- 7.3 Demasiado peso de sólidos en suspensión al comienzo de la prueba (interferencia en el proceso de sedimentación).
- 7.4 Cambios diferenciales de temperatura en la probeta, o bien demasiada oscilación de las temperaturas durante la prueba, lo cual genera movimientos de convección que influyen en el ensayo.
- 7.5 Vástago del hidrómetro sucio.
- 7.6 Vástago del hidrómetro húmedo arriba de la superficie de la suspensión (el agua arriba de la superficie aumenta el peso del hidrómetro y lo hace que se hunda más).
- 7.7 Falta de cuidado en la inserción y remoción del hidrómetro en la suspensión, de modo que se ocasione turbulencia.

BIBLIOGRAFIA

1. ASTM (1990), " Standard test method for particle-size analysis of soils", D422-63, Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.08.
2. Bowles J. E.,(1980) "Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil", Segunda Edición, Mc. Graw Hill.

3. Cheng Liu, Jack B. Evett, (1997), Soil properties, Testing, Measurement, and Evaluation, "Grain-size analysis of soil (including both mechanical and hydrometer analysis) Third Edition, Prentice-Hall, Inc.
4. Division de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM (1976), "Laboratorio de Mecánica de Suelos, curso 445108".
5. Head K.H., " Manual of Soil Laboratory Testing", Vol. 1, Editorial Pentech Press, London, 1982.
6. Laboratoire Central des ponts et chaussées (1987), "Analyse granulométrique par sédimentométrie", Méthode d'essai, N° 18.
7. Secretaría de Recursos Hidráulicos (1970), "Manual de Mecánica de Suelos"

ANEXO A

A.1 Ley de Stokes

El análisis granulométrico de un suelo fino mediante hidrómetro se basa en el hecho de que en un medio líquido en reposo, la velocidad de sedimentación de las partículas sólidas, es función de su tamaño.

Para una partícula de suelo de dimensiones conocidas, la velocidad de sedimentación crece al principio rápidamente por efecto de la gravedad, hasta alcanzar un valor constante, el cual se obtiene en el momento en que la resistencia que ofrece el fluido a la caída de la partícula, iguala a su peso.

De acuerdo con Stokes la resistencia que opone un fluido de viscosidad η a una esfera de diámetro D , cuando ésta se precipita a una velocidad v , es igual a:

$$F_R = 3\pi\eta Dv \dots(a.1)$$

Por otra parte, el peso sumergido de la esfera es igual a:

$$W' = \frac{1}{6}\pi D^3 (\gamma_s - \gamma_w) \dots(a.2)$$

donde:

γ_s : peso específico del material de la esfera.

γ_w : peso específico del fluido (agua).

En el momento en que la esfera alcanza su velocidad de precipitación constante, se cumple que $F_R=W'$, por lo que podemos establecer:

$$3\pi\eta Dv = \frac{1}{6}\pi D^3 (\gamma_s - \gamma_w) \dots(a.3)$$

de donde se puede despejar la velocidad v para llegar a la conocida ley de Stokes:

$$v = g \left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\eta} \right) D^2 \dots(a.4)$$

En los análisis granulométricos de suelos finos, usando la técnica del hidrómetro, es necesario manejar el concepto de "diámetro equivalente", ya que las partículas que constituyen los suelos finos distan mucho de la forma esférica.

A.2 Cálculo del porcentaje de partículas de suelo contenidas en una suspensión, inferiores a un cierto diámetro D

El peso específico de la suspensión suelo-agua, γ_{sus} , a la profundidad H_r , y en un tiempo t , está dado por la lectura del hidrómetro r :

$$r = \frac{\gamma_{sus}}{\gamma_w} \dots(a.5)$$

Por otra parte, el peso específico de la suspensión es la suma, por unidad de volumen, del:

- a) Peso W_1 de las partículas sólidas de diámetro equivalente inferior a D .
- b) Peso W_2 del agua de la suspensión.

El peso W_1 se puede expresar como un porcentaje p del peso seco del suelo utilizado en la prueba, así:

$$W_1 = \frac{pW_s}{100V} \dots (a.6)$$

Para calcular W_2 , hay que tomar en cuenta que los granos sólidos ocupan un volumen igual a:

$$V_s = \frac{pW_s}{100V\gamma_s} \dots (a.7)$$

Por lo tanto, el volumen del agua de la suspensión es igual a:

$$V_w = 1 - \frac{pW_s}{100V\gamma_s} \dots (a.8)$$

El peso del agua de la suspensión es simplemente:

$$W_2 = \left[1 - \frac{pW_s}{100V\gamma_s} \right] \gamma_w \dots (a.9)$$

Puesto que:

$$\gamma_{sus} = r\gamma_w = W_1 + W_2 \dots (a.10)$$

Sustituyendo valores en esta última ecuación, se obtiene:

$$\frac{pW_s}{100V\gamma_s} = \left[1 - \frac{pW_s}{100V\gamma_s} \right] = r\gamma_w \dots (a.11)$$

De donde:

$$p = 100 \frac{V}{W_s} \left\{ \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_w} \right\} \gamma_w (r - 1) \dots (a.12)$$

Puesto que $r = 1 + \frac{R}{1000}$, siendo R el número de divisiones entre la marca 1000 y una lectura cualquiera del hidrómetro, entonces la ecuación (a.12), se puede escribir como:

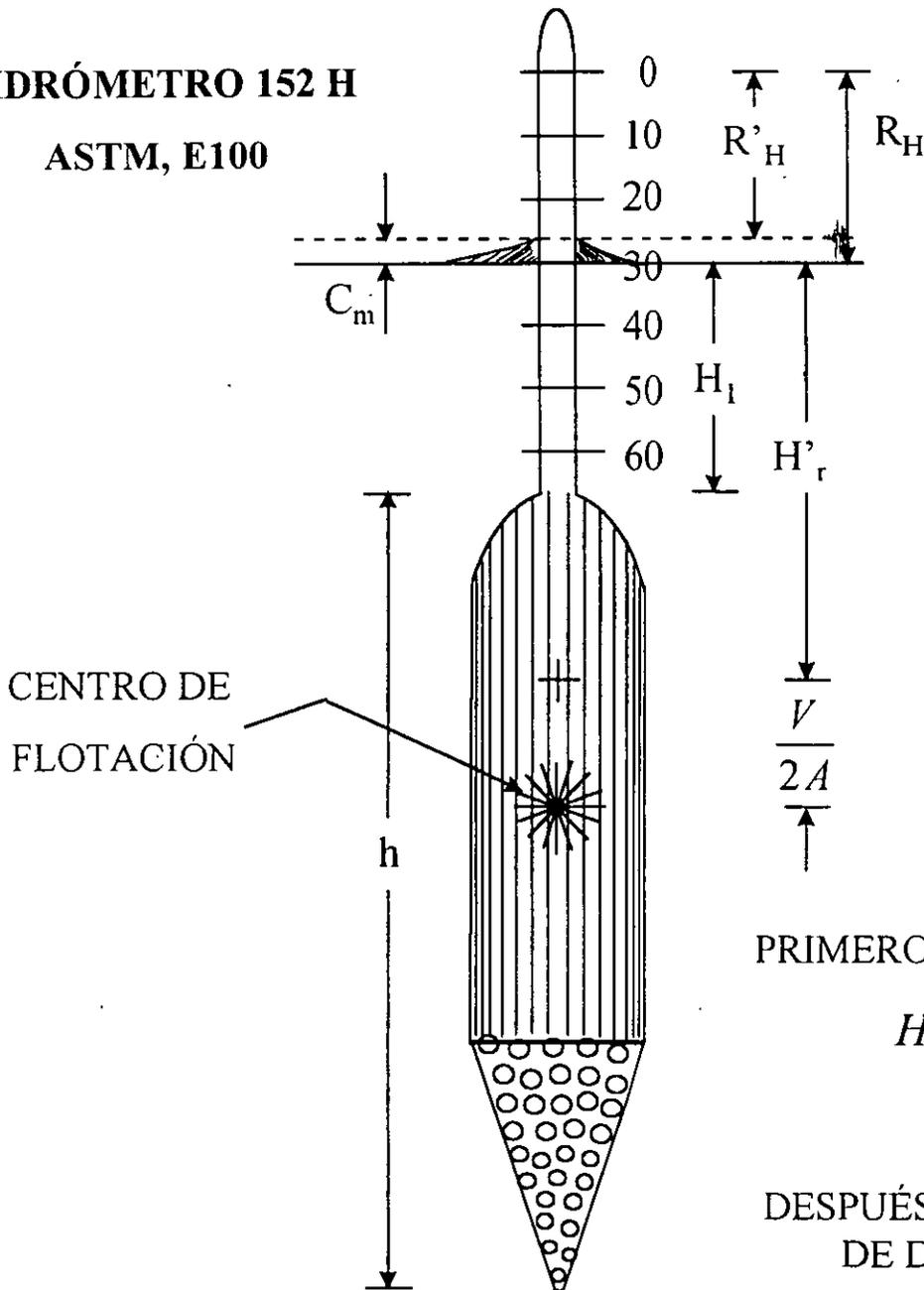
$$p = 100 \frac{V}{W_s} \left\{ \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_w} \right\} \gamma_w \frac{R}{10} \dots (a.13)$$

Esta última ecuación permite calcular el porcentaje de partículas sólidas, menores que un cierto diámetro D , que existen en una suspensión suelo-agua, a la profundidad H , y en un tiempo t .

DIMENSIONES Y TÉRMINOS DEL HIDRÓMETRO

HIDRÓMETRO 152 H

ASTM, E100



PRIMEROS DOS MINUTOS

$$H'_r = H_1 + \frac{h}{2}$$

DESPUÉS DE LA LECTURA
DE DOS MINUTOS

$$H_r = H_1 + \frac{1}{2} \left(h - \frac{V}{A} \right)$$

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO MEDIANTE HIDRÓMETRO

Calibración del hidrómetro

Matraz

| W matraz g | W matraz + agua (g) | T1 °C | T2 °C | T3 °C | Tprom °C | γ_w g/cm ³ | Ww g | Volumen cm ³ |
|---------------|------------------------|----------|----------|----------|-------------|---------------------------------|---------|----------------------------|
| 182.09 | 679.08 | 19.2 | 19.3 | 19.7 | 19.4 | 0.9983 | 496.99 | 497.83 |

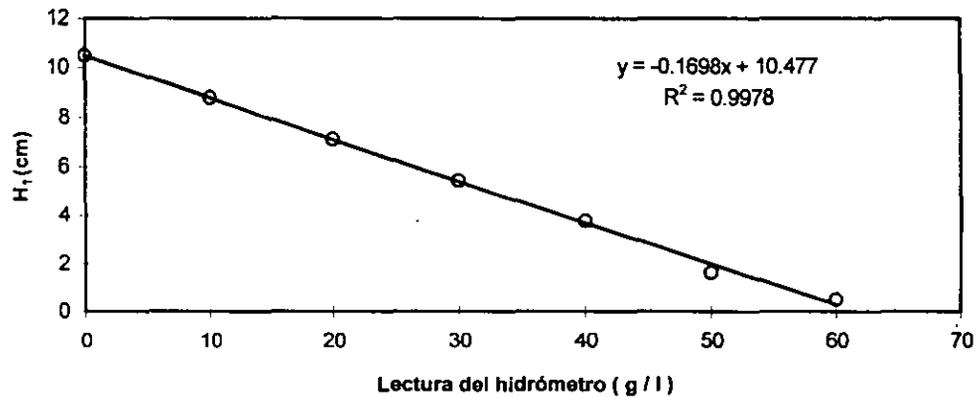
Soluciones

| W sal g | Wmat+sal g | T1 °C | T2 °C | Tprom °C | γ_{sol} g/cm ³ | Lec. Hidro g/l |
|------------|---------------|----------|----------|-------------|-------------------------------------|-------------------|
| 0 | 496.99 | 18.9 | 18.9 | 18.9 | 0.6325 | -1 |
| 4 | 500.99 | 19.1 | 19.1 | 19.1 | 0.6406 | 8.5 |
| 8 | 504.99 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 0.6486 | 17.5 |
| 12 | 508.99 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 0.6567 | 26 |

Marcas del hidrómetro

Hidrómetro

| Lectura Hidrom. | H1 cm |
|--------------------|----------|
| 0 | 10.474 |
| 10 | 8.774 |
| 20 | 7.102 |
| 30 | 5.436 |
| 40 | 3.762 |
| 50 | 1.636 |
| 60 | 0.497 |



H1 = Distancia del cuello del bulbo
a las principales marcas
de calibración

h = 13.71 cm
Vol. = 84.34 cm³
Area = 27.34 cm²

Corrección por menisco

| T1 °C | T2 °C | Tprom °C | Lec. hid. menisco inferior | Lec. hid. menisco superior | Cm (+) |
|----------|----------|-------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------|
| 19.5 | 19.8 | 19.7 | -1 | -2 | 1 |

Corrección por defloculante

| W deflo gr | Lectura del hidrómetro menisco superior | Cd (-) |
|---------------|--|-----------|
| 3 | 2.5 | 1.5 |

Desarrollo de la prueba durante los primeros 2 minutos

| Tiempo min | Lec Hidro. R _H | Lec Hidro. R _H |
|---------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 0.5 | 36 | 37 |
| 1 | 31.5 | 32.5 |
| 2 | 29.5 | 30.5 |

| Tiempo min | T °C | Lec. Hidro. R _H | Lec. Hidro. R _H | H1 (cm) | Altura de caída H _r (cm) | Valores de K | D mm | Lec Hidro. R | P (%) |
|---------------|---------|----------------------------------|----------------------------------|------------|---|--------------------|---------|--------------------|----------|
| 0.5 | 21.2 | 36 | 37 | 4.19 | 11.049 | 0.01331 | 0.0626 | 35.74 | 90.94 |
| 1 | 21.2 | 31.5 | 32.5 | 4.92 | 11.777 | 0.01331 | 0.0457 | 31.24 | 79.49 |
| 2 | 21.3 | 29.5 | 30.5 | 5.25 | 12.102 | 0.0133 | 0.0327 | 29.26 | 74.45 |

G_s = 2.68

a = 0.99238

W_s (g) = 39

Desarrollo de la prueba después de los 2 minutos

| Hora | T °C | Tiempo min | Lec. Hidro. R _H | Lec. Hidro. R _H | H ₁ (cm) | Altura de caída H ₁ r (cm) | Valores de K | D mm | Lec. Hidro. R | P (%) |
|-------|------|------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------------------------|--------------|--------|---------------|-------|
| 12:38 | | | | | | | | | | |
| 12:42 | 21.3 | 4 | 25 | 26.0 | 6.06 | 11.375 | 0.0133 | 0.0224 | 24.76 | 63.00 |
| 12:53 | 21.4 | 15 | 20 | 21.0 | 6.91 | 12.224 | 0.01328 | 0.0120 | 19.78 | 50.33 |
| 13:08 | 21.3 | 30 | 18 | 19.0 | 7.25 | 12.563 | 0.0133 | 0.0086 | 17.76 | 45.19 |
| 13:38 | 20.9 | 60 | 15.5 | 16.5 | 7.68 | 12.988 | 0.01336 | 0.0062 | 15.18 | 38.63 |
| 14:38 | 20.7 | 120 | 13.5 | 14.5 | 8.01 | 13.327 | 0.01339 | 0.0045 | 13.14 | 33.44 |
| 16:38 | 20.2 | 240 | 12.5 | 13.5 | 8.18 | 13.497 | 0.01347 | 0.0032 | 12.04 | 30.64 |
| 20:38 | 21.9 | 480 | 10 | 11.0 | 8.61 | 13.922 | 0.0132 | 0.0022 | 9.88 | 25.14 |
| 12:38 | 19.5 | 1440 | 8.5 | 9.5 | 8.86 | 14.176 | 0.01359 | 0.0013 | 7.9 | 20.10 |
| 16:55 | 20 | 1697 | 8 | 9.0 | 8.95 | 14.261 | 0.01351 | 0.0012 | 7.5 | 19.08 |

| D mm | Pasa | | Retenido parcial | |
|------|------|------|------------------|------|
| | % | peso | % | peso |

Tabla respecto a los 39 gr que pasaron la malla No. 200

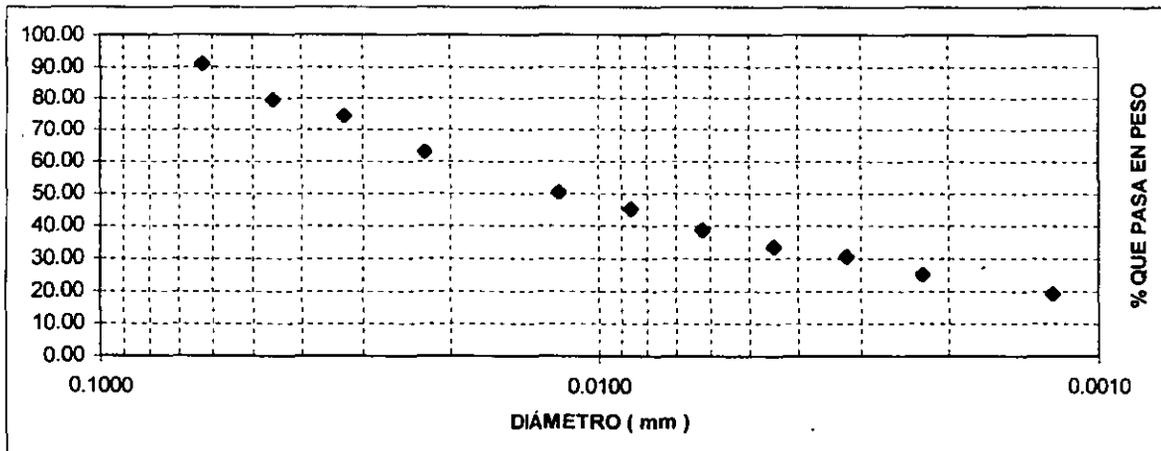
Se asumió teóricamente que en el D = 0 mm

Sin embargo para D=0 no se puede representar en escala logarítmica, pero es la única forma en que la sumatoria de los % sea igual a 100.

| | | | | |
|--------|-------|--------|-------|-------|
| 0.0626 | 90.94 | 35.468 | 9.06 | 3.532 |
| 0.0457 | 79.49 | 31.002 | 11.45 | 4.466 |
| 0.0327 | 74.45 | 29.037 | 5.04 | 1.965 |
| 0.0224 | 63.00 | 24.571 | 11.45 | 4.466 |
| 0.0120 | 50.33 | 19.629 | 12.67 | 4.942 |
| 0.0086 | 45.19 | 17.625 | 5.14 | 2.005 |
| 0.0062 | 38.63 | 15.064 | 6.56 | 2.560 |
| 0.0045 | 33.44 | 13.040 | 5.19 | 2.024 |
| 0.0032 | 30.64 | 11.948 | 2.80 | 1.092 |
| 0.0022 | 25.14 | 9.805 | 5.50 | 2.144 |
| 0.0012 | 19.08 | 7.443 | 6.06 | 2.362 |
| 0 | 0 | 0.000 | 19.08 | 7.443 |

39.000

Curva granulométrica de la fracción fina



CURVA DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA

HUMEDAD NATURAL

| PRUEBA No. | CAPSULA No. | PESO CAPSULA MAS SUELO HUMEDO | PESO CAPSULA MAS SUELO SECO | PESO DEL AGUA | PESO DE LA CAPSULA | PESO DEL SUELO SECO | CONTENIDO DE AGUA (W) |
|---------------|----------------|--|-----------------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 1 | 39 | 26.88 | 26.24 | 0.64 | 9.32 | 16.92 | 3.78 |
| 2 | 46 | 37.48 | 37.47 | 0.01 | 9.2 | 28.27 | 0.04 |
| 3 | 53 | 38.26 | 36.66 | 1.6 | 9.5 | 27.16 | 5.89 |

w% **3.24**

| Malla No. | Abertura mm | Peso retenido g | Retenido parcial % | Porcentaje que pasa % |
|-----------|----------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 1 1/2 | 38.1 | 0 | 0.00 | 100.00 |
| 1 | 25.4 | 0 | 0.00 | 100.00 |
| 3/4 | 19.1 | 108 | 2.30 | 97.70 |
| 1/2 | 12.7 | 165 | 3.52 | 94.18 |
| 3/8 | 9.52 | 149.5 | 3.19 | 90.99 |
| 4 | 4.76 | 417.5 | 8.90 | 82.09 |
| 10 | 2 | 467.97 | 9.98 | 72.11 |
| 20 | 0.84 | 334.59 | 7.14 | 64.97 |
| 40 | 0.42 | 338.79 | 7.23 | 57.74 |
| 60 | 0.25 | 276.20 | 5.89 | 51.85 |
| 100 | 0.149 | 330.05 | 7.04 | 44.82 |
| 200 | 0.074 | 293.16 | 6.25 | 38.56 |
| | 0.0626 | 19.321 | 3.49 | 35.07 |
| | 0.0457 | 24.427 | 4.42 | 30.65 |
| | 0.0327 | 10.748 | 1.94 | 28.71 |
| | 0.0224 | 24.427 | 4.42 | 24.30 |
| | 0.0120 | 27.032 | 4.89 | 19.41 |
| | 0.0086 | 10.965 | 1.98 | 17.43 |
| | 0.0062 | 14.005 | 2.53 | 14.90 |
| | 0.0045 | 11.073 | 2.00 | 12.89 |
| | 0.0032 | 5.971 | 1.08 | 11.81 |
| | 0.0022 | 11.725 | 2.12 | 9.69 |
| | 0.0012 | 12.919 | 2.34 | 7.36 |
| | 0.0000 | 40.711 | 7.36 | 0.00 |

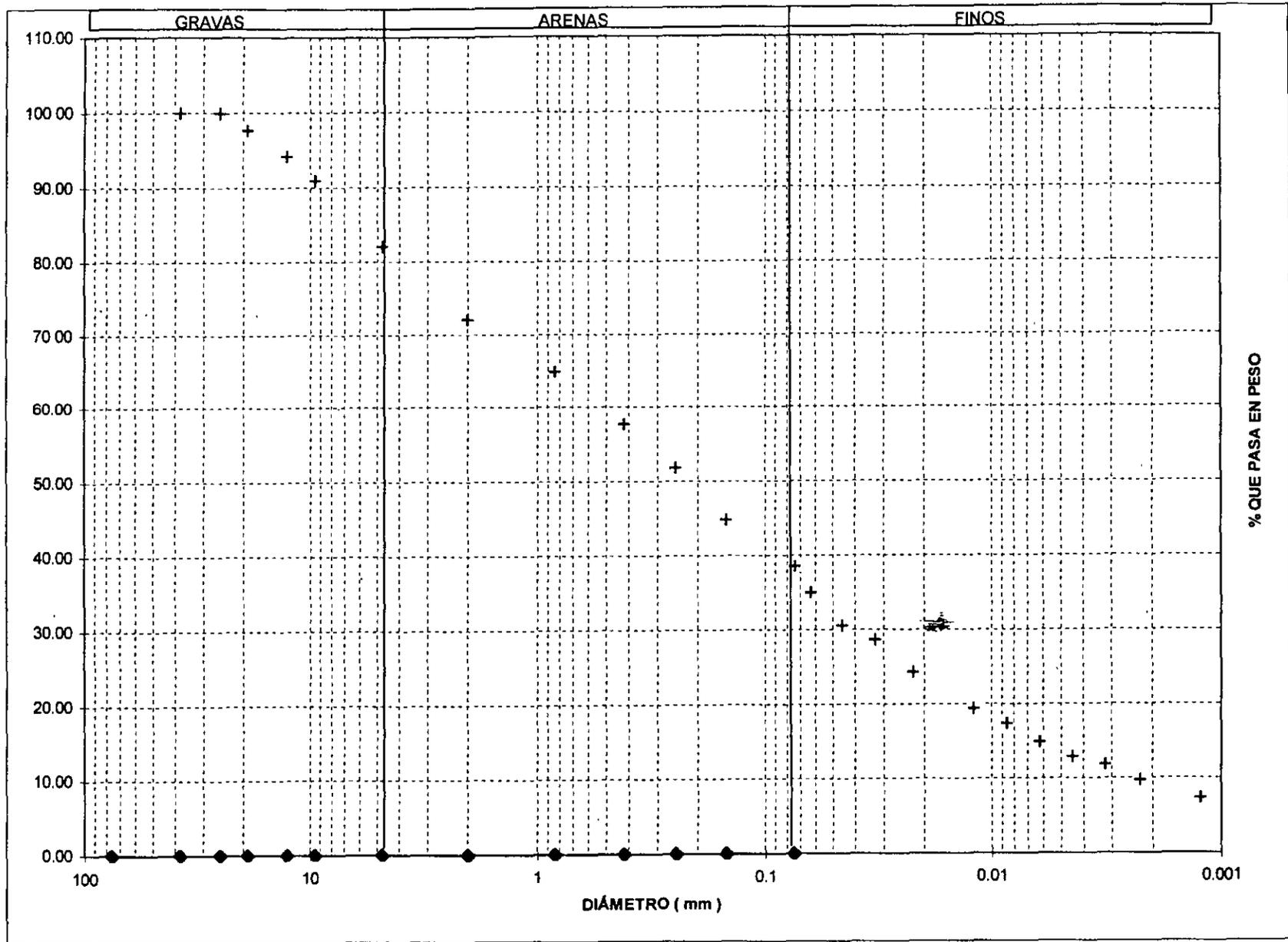
Peso total de la muestra
 4689 g
Pasa #4 3729.16 g
Pasa #200 213.3236 g
Factor 17.4812351

D10 0.0024 mm
D30 0.043 mm
D60 0.52 mm

Cu 216.66
Cc 1.4815

GRAVAS 27.89 %
ARENAS 33.55 %
FINOS 38.56 %

SUCS **SM**
 con presencia de gravas

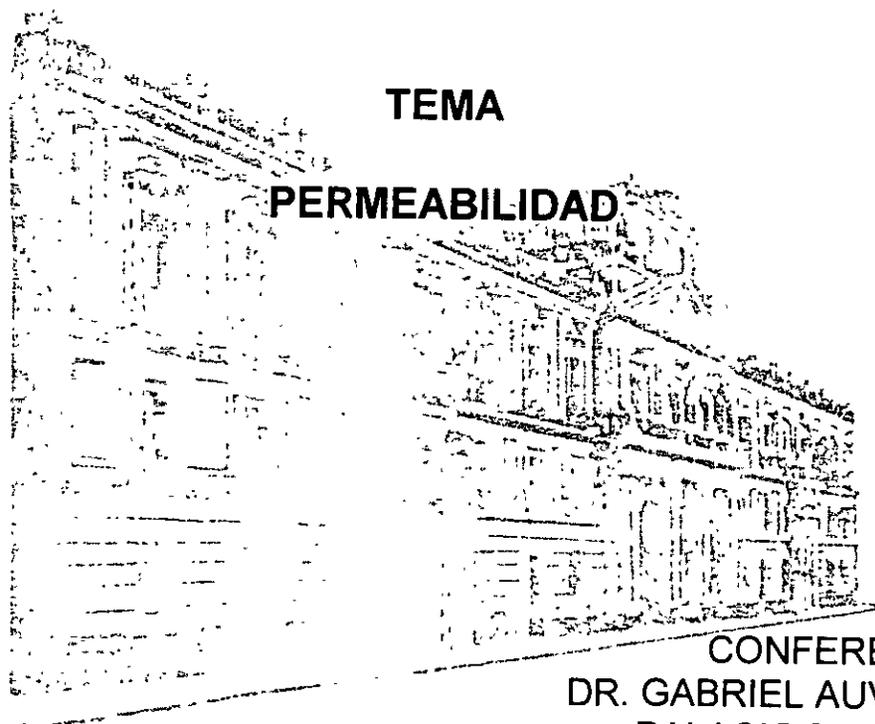




**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS I



TEMA

PERMEABILIDAD

**CONFERENCISTA
DR. GABRIEL AUVINET G.
PALACIO DE MINERÍA
MAYO 2000**

PERMEABILIDAD

Ley de Darcy

$$v = -ki$$

$$q = -kiA$$

V : velocidad aparente de flujo [LT^{-1}]

q : gasto [L^3T^{-1}];

i : gradiente hidráulico;

A : Sección total [L^2];

k : conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad [LT^{-1}].

Unidades de k : m/s , cm/s o $darcys$ ($1\text{ cm/s} = 1.04 \times 10^3\text{ darcys}$).

Tensor de permeabilidad

Suelo anisótropo con ortotropía de eje vertical:

$$\vec{v} = -\vec{k}\vec{i}$$

$$\vec{k} = \begin{bmatrix} k_h & 0 & 0 \\ 0 & k_h & 0 \\ 0 & 0 & k_v \end{bmatrix}$$

Permeabilidad intrínseca:

$$q = -K \frac{\gamma_w}{\mu} iA$$

γ_w peso volumétrico del fluido [$ML^{-2}T^{-2}$]

μ viscosidad, [$ML^{-1}T^{-1}$]

K permeabilidad intrínseca [L^2].

Suelos parcialmente saturados:

$$q = - \frac{k(\theta)}{\gamma_w} \frac{d\phi}{dx} A$$

θ contenido de agua volumétrico

ϕ potencial hidráulico

x distancia de flujo.

Medición de la permeabilidad:

- en condiciones de flujo *establecido*
- en condiciones de flujo *transitorio*

PRUEBAS DE CAMPO EN SUELOS NATURALES

Pruebas de absorción

Prueba Nasberg

Prueba USBR E-19

Prueba Lefranc-Mandel

Pruebas de inyección

Prueba Lugeon

Pruebas de bombeo

Método de Theis-Lubin

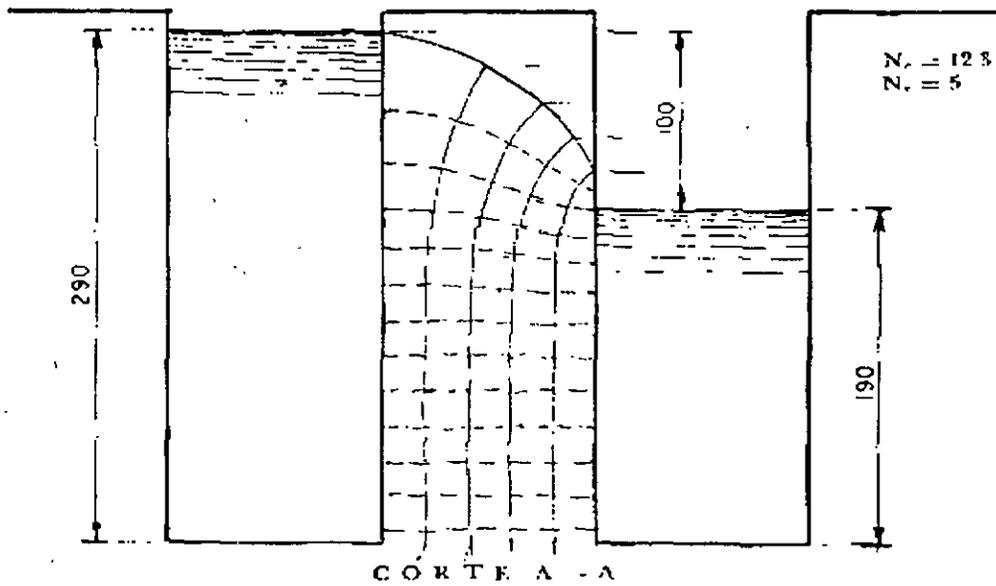
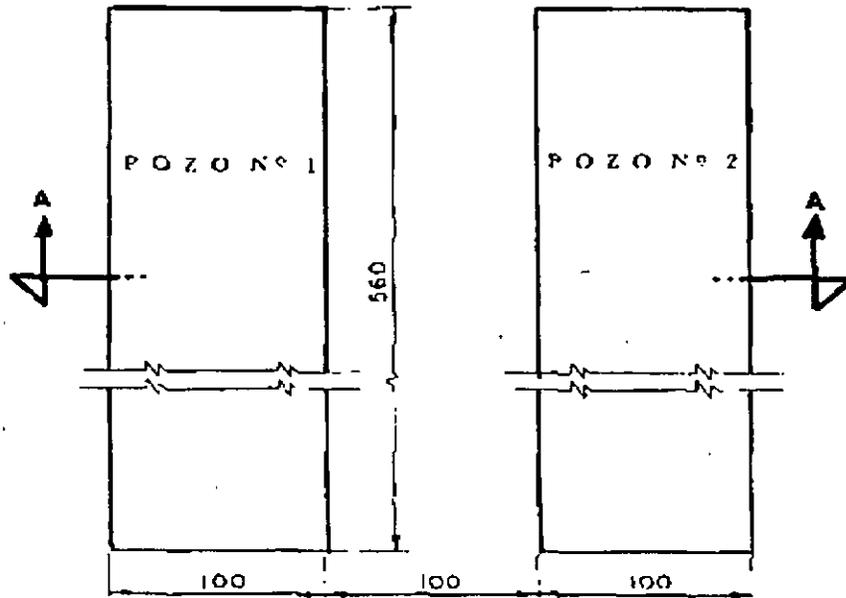
Método de Dupuit-Thiem

Pruebas de filtración

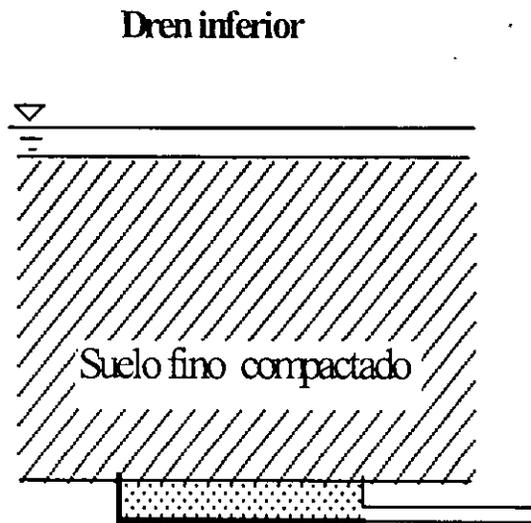
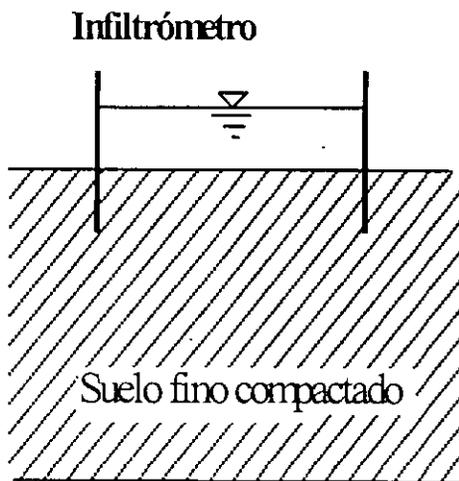
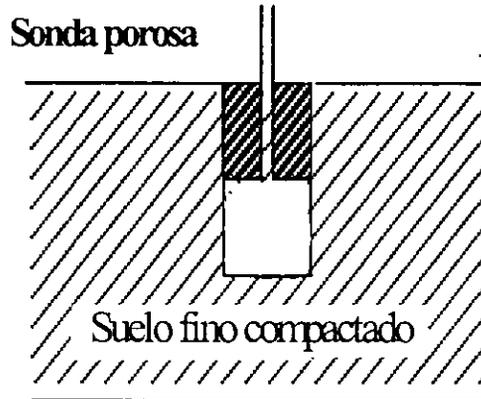
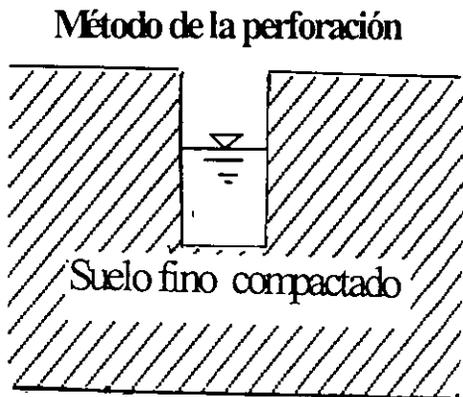
Pozos de filtración

Matsuo-Akai

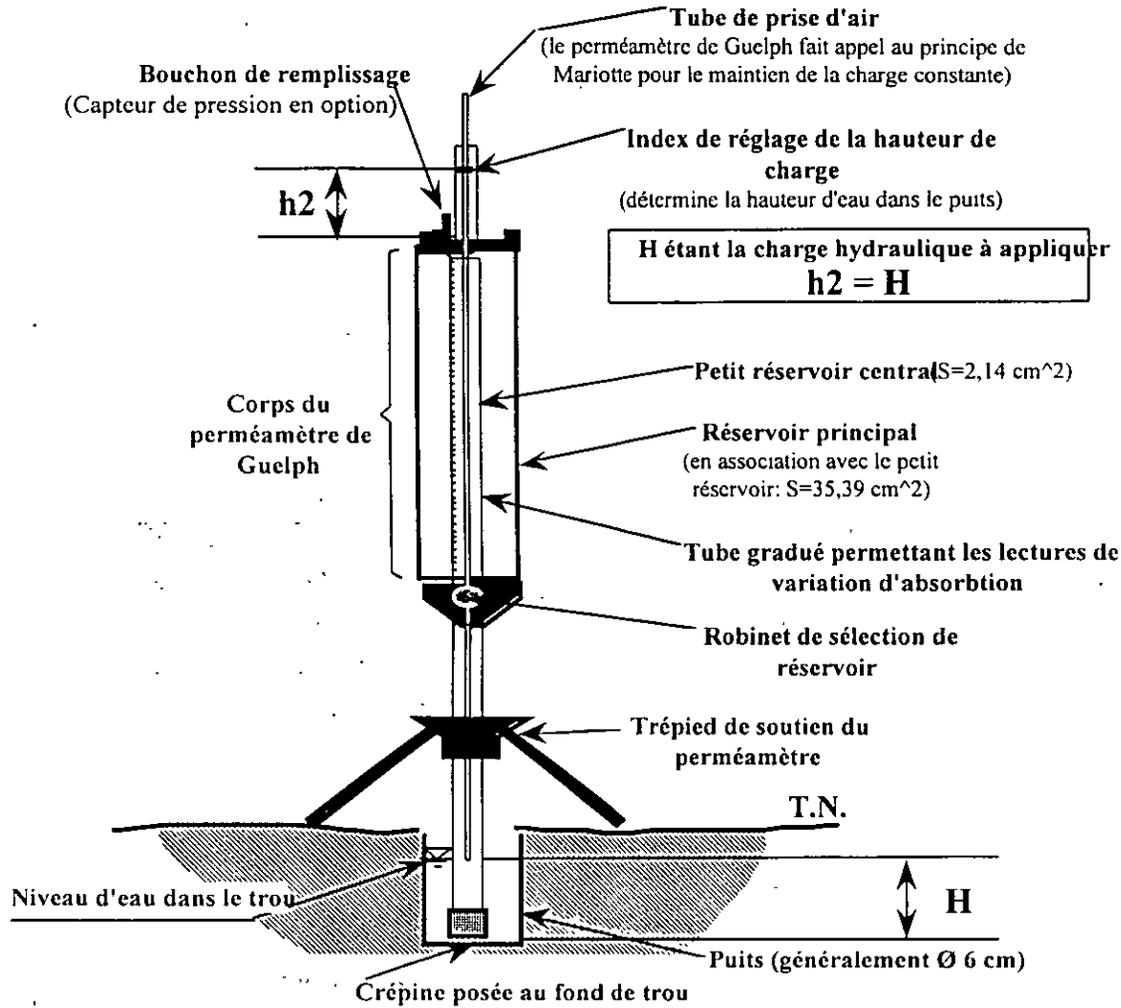
Prueba Matsuo-Akai



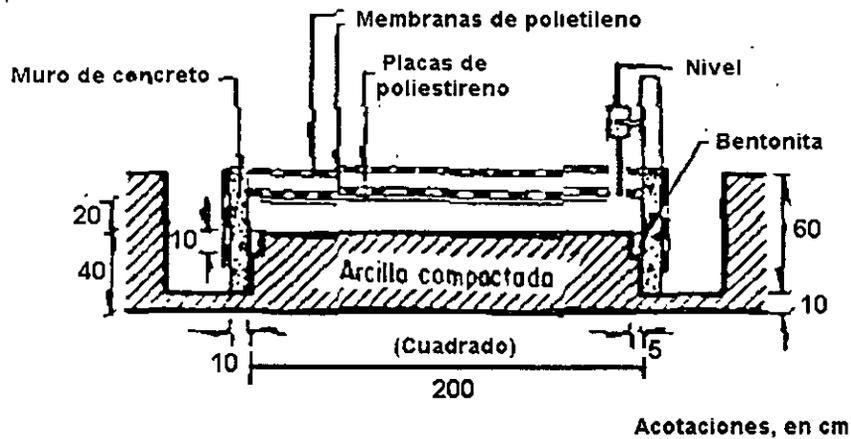
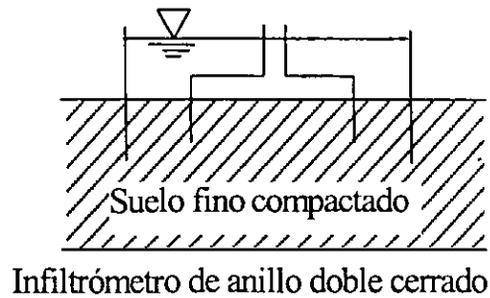
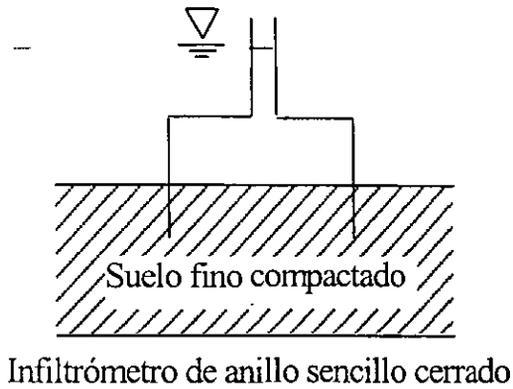
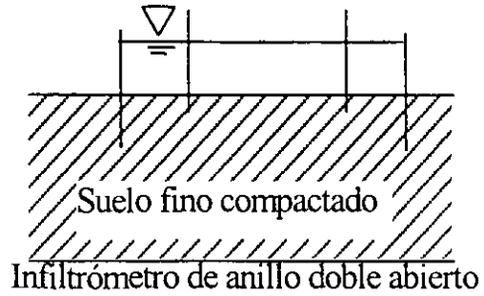
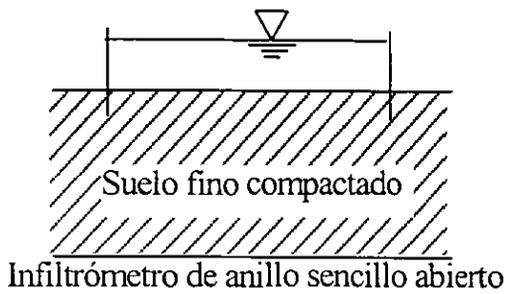
PRUEBAS DE CAMPO EN SUELOS COMPACTADOS



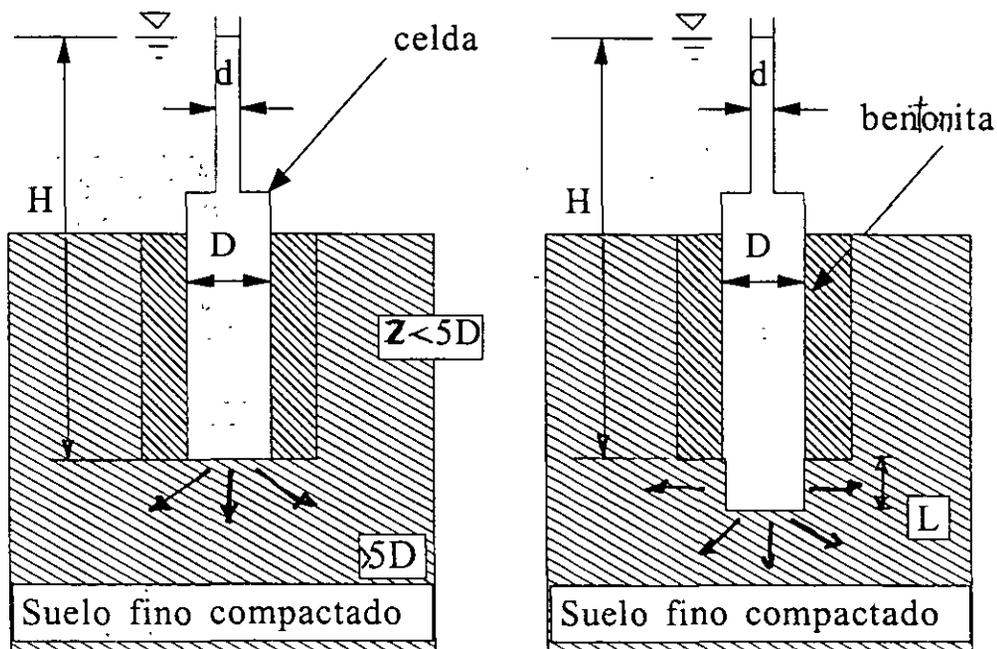
Perméamètre de Guelph



INFILTRÓMETROS



Permeámetro de Boutwell



(a) Etapa I

(a) Etapa II

1ª Etapa:

$$k_1 = \frac{\pi d^2}{11D(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right)$$

d = diámetro del tubo, m

t_1 = tiempo inicial, s; t_2 = tiempo final, s

H_1 y H_2 = nivel del agua en el tubo en el instante inicial t_1 y final t_2 , m

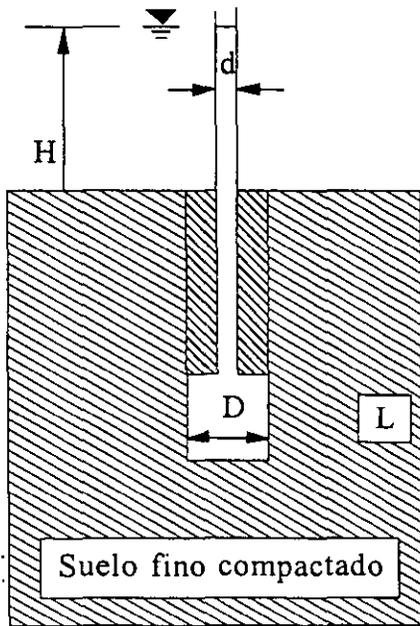
D = diámetro de la perforación, m

k_1 = conductividad hidráulica en la etapa I, m/s.

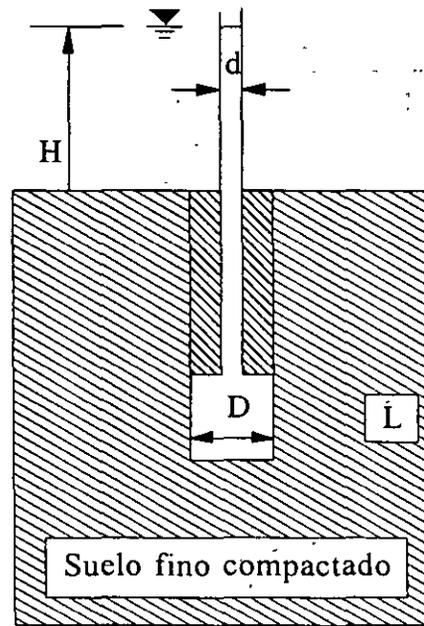
2ª Etapa:

$$k_2 = \frac{A}{B} \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right)$$

Sonda porosa

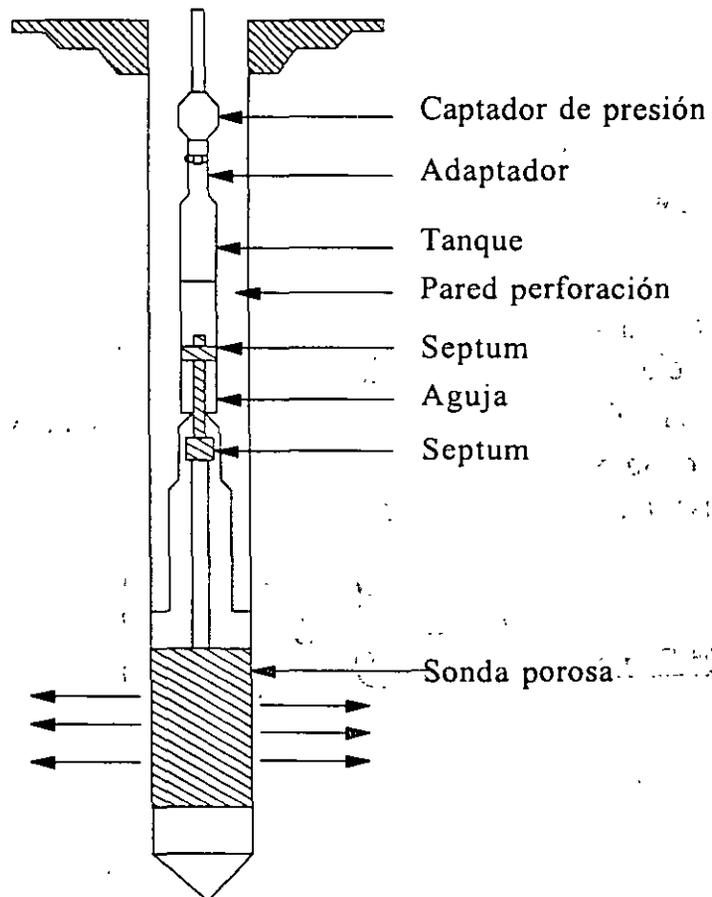


(a) base permeable



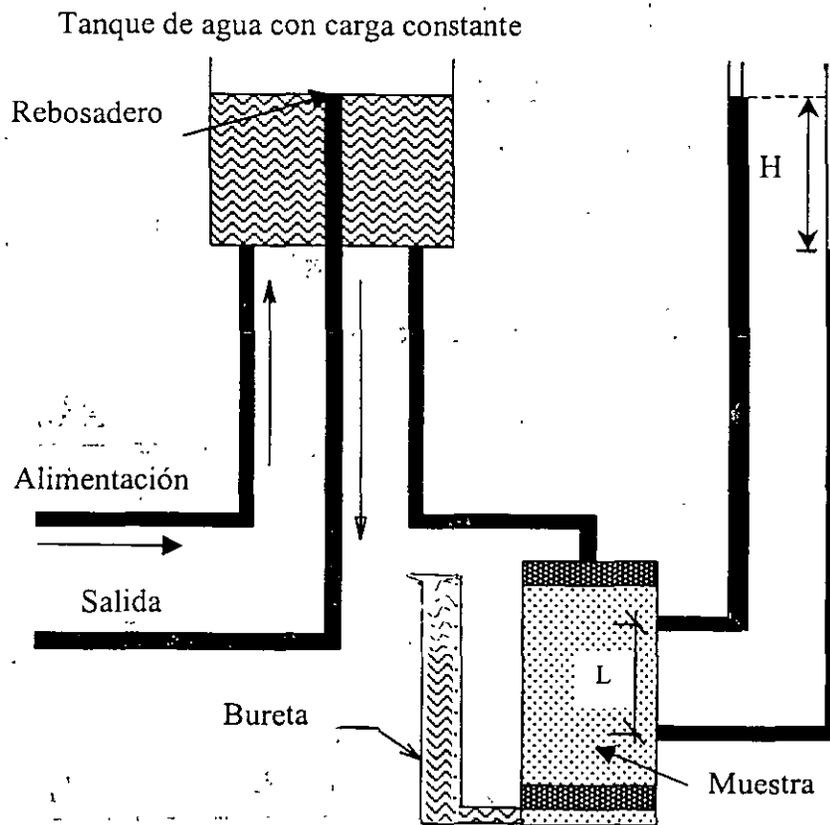
(b) base impermeable

Sonda de Andersen



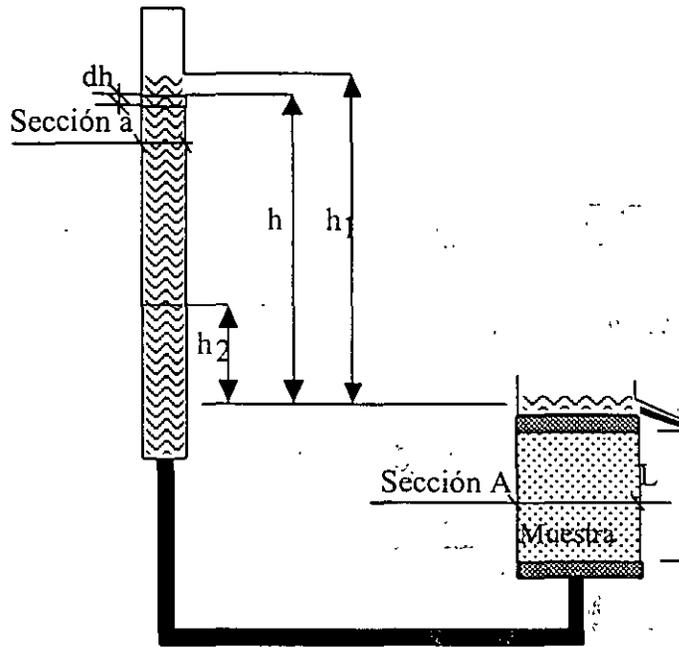
PRUEBAS DE LABORATORIO

Permeámetro de carga constante



$$k = \frac{V}{tA} \frac{L}{H}$$

Permeámetro de carga variable



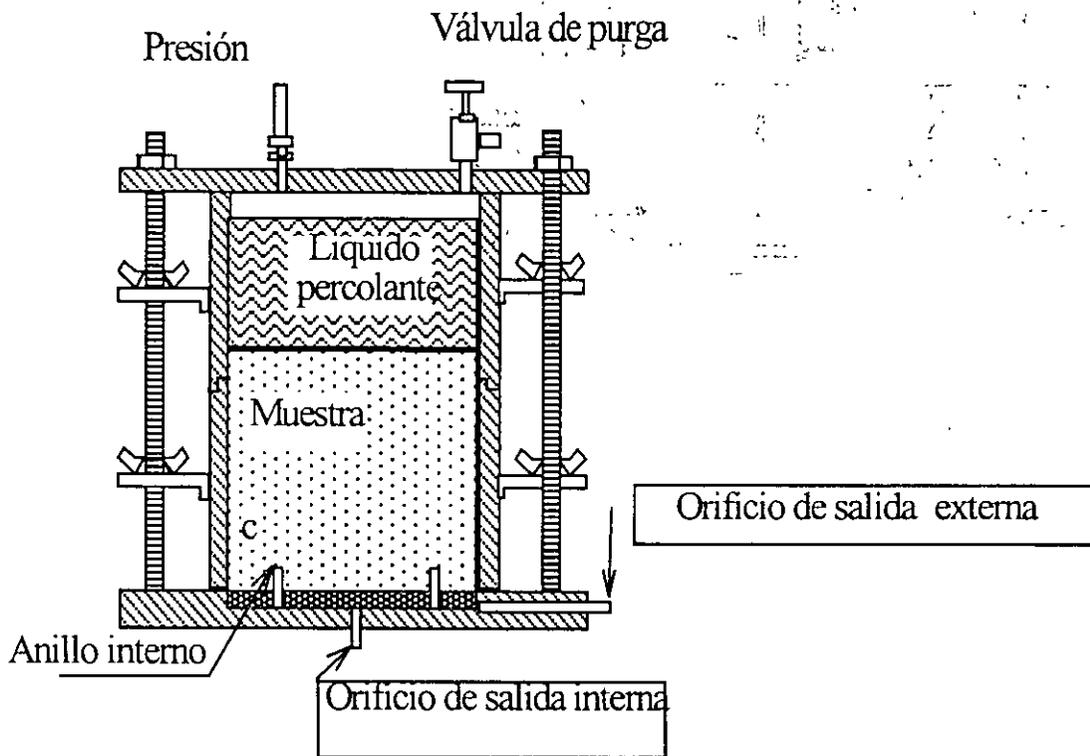
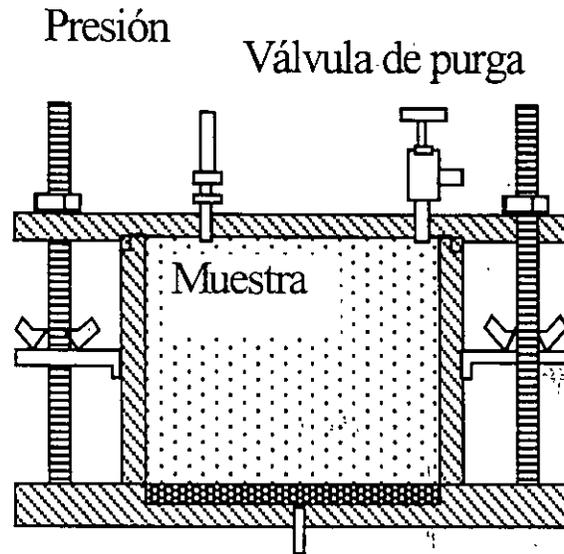
$$i = \frac{h}{L} \quad q = Av = \frac{Akh}{L}$$

$$qdt = \frac{Akh}{L} dt = -adh$$

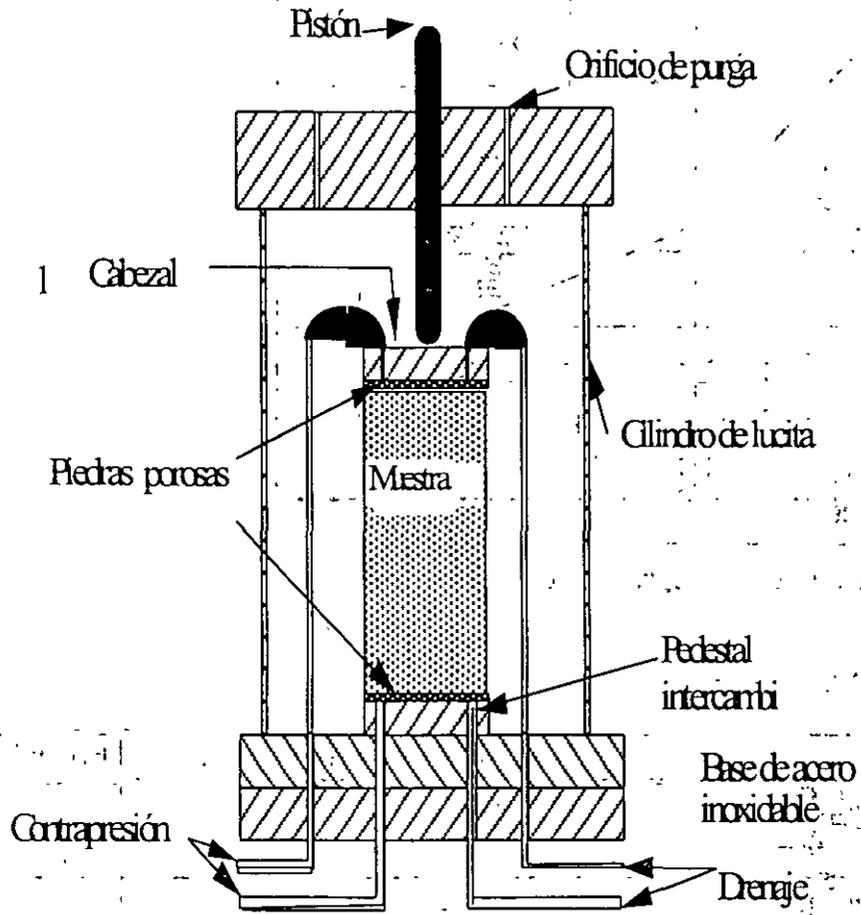
Integrando entre h_1 et h_2 , se obtiene :

$$k = 2,3 \frac{a}{A} \frac{L}{(t_2 - t_1)} \lg \frac{h_1}{h_2}$$

Permeámetros de pared rígida



Permeámetro de pared flexible



Influencia del contenido de agua de compactación

