

3. PRUEBAS ÍNDICE DE LABORATORIO DEL MATERIAL ELEGIDO

3.1. Conceptos fundamentales

Para entender las propiedades físicas que definen los suelos para que esto pueda sostener una edificación son variadas dependiendo del tipo de material del cual estén compuestos.

Los materiales que están presentes en los suelos se clasifican en 4 tipos como son: arenas y gravas, limos, arcillas y materia orgánica. Las arenas y grava son materiales granulares no plásticos. Las arcillas, se componen de partículas mucho más pequeñas, exhiben propiedades de plasticidad y son muy cohesivas. Los limos son materiales intermedios en el tamaño de sus partículas y se comportan, de modo típico, como materiales granulares, aunque pueden ser algo plásticos. La materia orgánica consta principalmente de desechos vegetales.

El origen de las capas de suelo o terreno edafológico y la forma como se depositan, arroja mucha luz sobre su naturaleza y variabilidad en el campo. Los suelos son de dos orígenes: residual y sedimentario.

Los suelos residuales se forman “in situ” por la intemperización química de las rocas y, puesto que jamás han sido perturbados físicamente, conservan las características geológicas menores del material rocoso de origen. Los suelos sedimentarios son transportados y depositados por la acción de ríos, mares, glaciares y vientos. En general, el mecanismo de sedimentación regula la granulometría, tamaño de las partículas, sus variaciones, y la estratigrafía y uniformidad de las capas edafológicas.

Para una identificación completa de un suelo se tiene que tomar en cuenta: el tamaño, granulometría, forma, orientación, composición química de las partículas y las fracciones sedimentables que contiene.

Cuando las propiedades superficiales de las partículas son importantes, las formas de éstas adquieren por lo menos la misma importancia que la granulometría. En condiciones normales, una característica significativa es la ubicación relativa de las partículas dentro del suelo, lo que determina la resistencia a los desplazamientos internos y constituye, por lo menos, una medida cualitativa de las fuerzas de resistencia a las fuerzas cortantes y a la compresión.

Se han realizado muchos intentos de clasificación del suelo o terrenos con base en propiedades comunes e identificables. Sin embargo, conforme se ha ido acumulando información acerca de las propiedades de los suelos, los sistemas de clasificación se han tornado cada vez más elaborados y complejos.

Un suelo o terreno cualquiera puede exhibir propiedades sólidas, viscosas, plásticas o líquidas; por tanto, cuando es posible predecir su verdadero estado físico, el diseño estructural de las cimentaciones se realiza tomando en cuenta esa información.

En contraste, los sólidos son materiales que tienen densidad, elasticidad y resistencia interna constantes, que se ven poco afectados por cambios normales de temperatura, variaciones en la humedad o vibraciones de intensidad inferior a los valores sísmicos. La deformación por fuerzas cortantes ocurre a lo largo de dos conjuntos de planos paralelos, cuyo ángulo es constante para cada material e independiente de la naturaleza o intensidad de las fuerzas externas que inducen a la deformación.

Estas propiedades básicas de los sólidos sirven para el diseño de cimentaciones sólo mientras los suelos siguen siendo sólidos. Pero si los cambios en las condiciones modifican las estructuras del

suelo, de modo que éstas ya no se comportan como sólidos, dichas propiedades se anulan y otro conjunto de reglas vienen a gobernar el nuevo estado físico.

Casi todos los suelos se comportan como sólidos, aunque sólo dentro de un cierto límite de carga, el cual depende de muchos factores externos, como flujo de humedad, temperatura, vibraciones, edad del suelo y, en algunos casos, velocidad de carga.

No existe subdivisión evidente entre los estados líquidos, plásticos. Estos tres estados de la materia tienen la propiedad común de que es muy difícil cambiar su volumen, aunque su forma cambia continuamente. Su diferencia estriba en la cantidad de fuerzas necesarias para comenzar su movimiento.

En el caso de los estados plásticos existe un valor mínimo necesario, pero en el caso de los líquidos, fuerzas prácticamente insignificantes ocasionan el movimiento.

Cuando la fuerza deja de ser aplicada, los materiales plásticos dejan de moverse, pero los de tipo líquido siguen moviéndose indefinidamente hasta que entran en juego fuerzas contrarrestantes.

En general, la división entre los estados sólido y plástico depende del porcentaje de humedad del suelo.

Dicho porcentaje, sin embargo, no es una constante, sino que disminuye al aumentar la presión a que está sometido el material. Por tanto, en los suelos saturados, la posibilidad de evitar desplazamientos o pérdidas de agua se traduce en la eliminación de problemas por cambio de volumen o por asentamiento.

Básicamente, las pruebas de laboratorio generan datos más exactos sobre las propiedades ingenieriles del suelo o terreno que las interpretaciones de las pruebas simples de campo, siempre que las muestras sean en verdad representativas de las condiciones del subsuelo. El análisis de suelos en laboratorios se ha desarrollado hasta convertirse en una maraña de pruebas interrelacionadas, con una variedad de criterios y métodos.

La American Society for Testing and Materials (ASTM) publica periódicamente un resumen de esos procedimientos. Muchas de las técnicas de prueba son exclusivamente aplicables a ciertos grupos de suelos, por lo que los datos resultan incorrectos cuando se intenta su utilización de alguna otra manera. Cuando estructuras afectables por los asentamientos, grandes terraplenes, presas o taludes pronunciados se van a cimentar sobre suelos blandos o de propiedades inciertas, conviene realizar pruebas de laboratorio sobre muestras representativas.

Por lo tanto se muestra una definición de una de las pruebas de laboratorio para conocer sus propiedades físicas de un determinado suelo en particular que es el objeto de esta tesis.

Las pruebas de índice, como las de los límites, de densidad y de distribución granulométrica, sirven para clasificar y caracterizar los suelos, conocer sus características ingenieriles generales, evaluar su aptitud como material de relleno y estimar su potencialidad de corrección mediante las técnicas de mejora del terreno. Es común realizar varias de estas pruebas en cada estrato de interés.

3.2. Granulometría

Cuando se hicieron las primeras investigaciones de las propiedades de los suelos se creían que las propiedades mecánicas dependían de las partículas que la constituyen, según su tamaño, por ello la búsqueda de métodos adecuados para obtener tal distribución aunque se ha creído que con una mayor experiencia es posible saber sus propiedades mecánicas de los suelos a partir de su distribución granulométrica o de la descripción por tamaños.

La granulometría puede determinarse por medio de mallas, la distribución por tamaños puede revelar algo de las propiedades físicas del material, según dicta la experiencia en la literatura nos indica que los suelos gruesos bien graduados, con amplia gama de tamaños, tienen un comportamiento ingenieril más aceptable.

En los suelos gruesos ha de mencionarse, que el comportamiento hidráulico y mecánico esta principalmente definido por la compacidad de los granos y su orientación, características que se destruyen por la manera en que se realiza la prueba de granulometría.

En suelos finos sin embargo, en estado inalterado, las propiedades mecánicas e hidráulicas dependen en tal grado su estructuración e historia geológica que el conocimiento de su granulometría resulta poco útil, sin embargo tenemos que tener interés para familiarizarse con los criterios técnicos basados en la distribución granulométrica y con los métodos más importantes para su determinación.

Sistema para clasificar un suelo mediante criterios de granulometría.

El tamaño de las partículas que constituyen un suelo forma una parte descriptiva y su consecuente clasificación. Este criterio usado en mecánica de suelo desde un principio, donde el suelo es cribado es posible efectuar el trazo de curvas granulométricas, contando con agrupaciones de las partículas del suelo en mayor número de tamaños diferentes. Las curvas se pueden ampliar notablemente en los tamaños finos, gracias a las técnicas de suspensiones.

Algunas clasificaciones granulométricas de los suelos según sus tamaños son las siguientes:

- a) Clasificación internacional.

Tamaño en mm

2.0	0.2	0.02	0.002	0.0002
Arena gruesa	Arena fina	limo	arcilla	Ultra- Arcilla (coloides)

- b) Clasificación M.I.T.

Fue propuesta por G. Gilboy y adoptada por el instituto de tecnología de Massachussts.

2.0	0.6	0.2	0.06	0.02	0.006	0.002	0.0006	0.0002
gruesa	media	fina	grueso	medio	fino	gruesa	media	Fina (coloides)
Arena			Limo			Arcilla		

c) La siguiente clasificación está basada en la proposición original de Kopecky

Material	Característica	Tamaño mm
Piedra	-----	Mayor de 70 mm
Grava	Gruesa	30 a 70
	Media	5 a 30
	Fina	2 a 5
Arena	Gruesa	1 a 2
	Media	0.2 a 1
	Fina	0.1 a 0.2
Polvo	Grueso	0.05 a 0.1
	Fino	0.02 a 0.05
Limo	Grueso	0.006 a 0.02
	Fino	0.002 a 0.006
Arcilla	Gruesa	0.0006 a 0.002
	Fina	0.0002 a 0.0006
Ultra-Arcilla	-----	0.00002 a 0.0002

Estas clasificaciones que se presentaron a continuación pueden tener contradicciones porque depende cada una y no es equivalente con la anterior. En los términos de limos y arcillas se determina como para definir un tipo de tamaño sin embargo estos son usados para designar tipos de suelo con propiedades físicas definidas. Un suelo de comportamiento típicamente arcilloso, dentro de los límites apropiados de humedad, posiblemente no contenga más de un 20% de arcilla según el criterio granulométrico.

Para poder representar la distribución granulométrica siempre que se cuente con un número suficiente número de puntos, la representación gráfica de la distribución granulométrica debe estimarse a la numérica en tablas.

La gráfica suele dibujarse con porcentajes como ordenadas y tamaños de las partículas como abscisas. Las ordenadas se refieren al porcentaje, en peso de las partículas menores que el tamaño correspondiente. La representación a escala semilogarítmica resulta preferible a la simple representación natural, pues en la primera se dispone de mayor amplitud en los tamaños finos y muy finos.

La forma de la curva da una idea de la distribución granulométrica del suelo, un suelo constituido por partículas de un solo tamaño, estará presentado por una línea vertical, y en un suelo que posea una curva muy tendida indica gran variedad en tamaños.

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

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

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 esta relación de 5-1 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 arena naturales muy uniformes rara vez presentan $C_u < 2$.

Como dato complementario necesario para la graduación, se defina como 1 el coeficiente de curvatura del suelo con la expresión:

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

D_{30} Se define como los D_{60} y D_{10} 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.

En un análisis mecánico se comprenden 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 malla y el análisis de una suspensión del suelo con hidrómetro.

En nuestra investigación nosotros realizamos el primero 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 pesar sucesivamente a través de un juego de tamices de de aberturas descendentes, hasta la malla 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 la mallas de mayor tamaño, el complemento al 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 correspondiendo a cada abertura.

El método que se utilizo para poder determinar la granulometría de nuestro suelo fue la basada en la norma **ASTM D 422 – 63**.

Este método cubre la determinación cuantitativa de la distribución del tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo.

La distribución de las partículas mayores que 0.075 mm (retenido tamiz N° 200) es determinada por tamizado, la muestra es separada por un proceso de cuarteo o por cualquier otro método que permita una adecuada selección de la fracción representativa de la muestra a estudiar. La fracción seleccionada se divide en dos porciones: una contiene sólo las partículas retenidas en el tamiz N°

10 y la otra porción contiene las que pasan el tamiz N° 10, la cantidad seleccionada debe ser tal que compense el peso de las fracciones más finas o más gruesas de la muestra a estudiar.



Fotografía 1 Juego de mallas para separar los diferentes diámetros de material



Fotografía 2 Tamizadora analítica, para muestras húmedas o secas

A continuación se dan unos valores que pueden servir de orientación de la cantidad de muestra a tomar en función del tamaño máximo de la partícula de suelo para el material retenido en la malla No, 10:

Diámetro nominal de la partícula más grande		Cantidad mínima de muestra que debe quedar retenida en el tamiz N.10
pulgadas	milímetros	gramos
3/8	9.5	500
3/4	19	1000
1	25.4	2000
1 ½	38.1	3000
2	50.8	4000
3	76.2	5000

El tamaño de la fracción que pasa la malla No.10 debe ser de aproximadamente 115 g para arenas y 65 g. para limos y arcillas.

La muestra seleccionada debe estar seca o someterla a proceso de secado al horno por 110+/- 5°C por 24 horas o hasta lograr peso constante.

De la fracción a estudiar se tiene en cuenta el peso. De la cantidad total se separan aproximadamente 50 g. pasa malla No. 200 con ésta se realizará la prueba por hidrómetro, la fracción restante será usada para la prueba de tamizado por mallas.

Separamos la porción de la muestra a analizar y determinamos su peso.

Se disponen las mallas en orden ascendente de menor a mayor número de malla (o sea de mayor a menor abertura), ubicando además la tapa y el fondo.

El material es depositado de tal forma que pase por todas las mallas, generando en ellos movimiento lateral y vertical que faciliten la circulación de la muestra, esta agitación puede desarrollarse de forma manual o mecánica.

Una vez finalizado el proceso de agitación, se retira el contenido de cada malla y se determina el peso del material retenido en cada uno de los tamices. Al final la sumatoria del material retenido en cada uno de los tamices debe ser igual a la usada originalmente en el proceso de tamizado.

De cada uno de los tamices se obtiene el porcentaje retenido individual:

$$\text{porcentaje retenido individual} = \frac{\text{peso individual}}{\text{peso total}} \times 100$$

Luego, realizando una sumatoria de los porcentajes retenidos individuales, se calcula el porcentaje retenido acumulado.

Después de describir los pasos, se obtuvieron los siguientes resultados de los tamices que se indican en la siguiente tabla:

mallas		
Tamaño de partículas	Masa retenida	%
(mm)	(g)	pasa
76.2(3")	-----	-----
50.8(2")	-----	-----
38.1(1 1/2")	-----	-----
25.4(1")	-----	-----
19.05(3/4")	-----	-----
12.7(1/2")	-----	-----
9.53(3/8")	-----	100
6.35(1/4")	0.30	99.7
4.76(N0. 4)	0.08	99.6

2(No. 10)	1.75	97.7
0.84(No. 20)	1.27	96.3
0.42(No. 40)	2.03	94.1
0.25(No. 60)	4.08	89.7
0.149(No. 100)	3.14	86.4
0.074(No. 200)	6.54	79.3

Masa de la muestra 92.78 gramos

De donde:

$$D_{60} = 0.06$$

$$D_{30} = 0.03$$

$$D_{10} = 0.01$$

Para obtener el coeficiente de uniformidad:

$$C_u = \frac{0.06}{0.01} = 6$$

Y el coeficiente de curvatura:

$$C_c = \frac{(0.03)^2}{0.06 \times 0.01} = 1.5$$

Preparación	Según ASTM D422	
Porción de la muestra	Guijarros	-----
	% Grava	0.4
	% Arenas	20.3
	% Finos	79.3

Por lo anterior se tiene que la clasificación de este suelo en particular es fino en su mayoría que corresponde a arcillas y limos.

3.3. Límites de consistencia

La propiedad física más notable de una arcilla y algunos limos, es su plasticidad. Esta propiedad puede ser estudiada cuantitativamente por medio de pruebas de rutina de laboratorio. Las más útiles de estas, se denominan pruebas de límite líquido y plástico, ideadas por Atterberg.

El límite líquido, según su definición, es el contenido de agua de un suelo, que se expresa en porcentaje del peso seco, que posee una consistencia tal que dos secciones de una muestra de suelo, colocadas en una copa y separadas por una ranura, apenas si se tocan, pero sin escurrir hasta juntarse, bajo el impacto de varios golpes fuertes. En la determinación de este límite definido arbitrariamente influye la técnica que adoptan los distintos operadores, el dispositivo diseñado por Casagrande, ha eliminado la influencia del factor personal en dicha prueba, proporcionando un medio mecánico, para obtener un impacto constante y una herramienta para hacer una ranura de dimensiones exactas.

El uso de este dispositivo ha sido adoptado por varios laboratorios como método normal para la prueba de límite líquido.

Para llevar a cabo la prueba de este dispositivo, se determina el número de golpes de golpes para necesarios para cerrar la ranura practicada en una muestra de suelo, en una distancia en $\frac{1}{2}$ de pulgada en el fondo. Se ha encontrado que empíricamente que la curva que se obtiene trazando una gráfica con el contenido de agua de las diversas consistencias del mismo suelo, a escala aritmética, y el número de golpes correspondientes a cada consistencia, a escala logarítmica, es

una línea recta. Por definición se llama a esta curva, curva de fluidez. El contenido de agua que corresponde a esta curva a 25 golpes es el límite líquido.

El límite plástico de un suelo se define como el contenido de agua, expresado en porcentaje del peso seco, con el cual se desmoronará al rodarse un cilindro de suelo de 3 mm (1/8”) de diámetro con la mano.

De la curva de escurrimiento, del límite líquido, L_w , y del límite plástico, P_w pueden determinarse los siguientes índices:

El índice de la plasticidad, $I_w = L_w - P_w$

El índice de fluidez, F_w , que es igual a la pendiente de la curva de fluidez.

El índice de tenacidad, $T_w = \frac{I_w}{F_w}$

Haciendo un análisis comparativo de los límites y los índices arriba descritos, se puede hacer una distinción entre las arcillas y los suelos no plásticos, así como su clasificación de acuerdo con el grado de plasticidad.

Para las pruebas se cuenta con el aparato de límite líquido, incluyendo la cucharilla para hacer la ranura, vidrios de reloj (2 ½” de diámetro), gotero, una capsula de vidrio (100 mm de diámetro), espátula, balanza analítica y horno de temperatura constante.



Fotografía 3 Copa Casagrande y demás aditamentos

Procedimiento para la prueba. Para seleccionar pruebas para los límites de las muestras se tiene que revisar si el material presenta características homogéneas. Teniendo en cuenta el contenido de agua, se seleccionará una muestra que contenga 150 a 200 gramos de peso seco. Todas las partículas mayores de cerca de 1/16 de pulgada deberán quitarse, determinado y registrando el porcentaje así eliminado. La extracción de estas partículas puede efectuarse mejor amasando el suelo con los dedos. La muestra deberá entonces colocarse en una cápsula de porcelana, mezclándola perfectamente con agua destilada hasta darle consistencia de una pasta muy espesa. Puede ser necesario dejar la mezcla en reposo toda la noche y mezclarla otra vez para asegurarse de que de que la pasta sea homogénea.

Prueba del límite líquido. En condiciones atmosféricas secas, esta prueba deberá efectuarse en un cuarto húmedo.

1. Coloca de 50 a 80 gramos aproximadamente de la muestra preparada, en la copa del aparato de límite líquido.

La cantidad de suelo usado no influye en el resultado de la prueba con tal de que se use una cantidad suficiente para obtener una ranura completa.



Fotografía 4 Copa Casagrande con el material

2. Alíse la superficie, y hágase una ranura con el ranurador. Al hacer la ranura la herramienta deberá sostenerse perpendicular a la superficie de la copa, cortando la muestra a lo largo de una línea perpendicular al eje de rotación del platillo, a través del centro de soporte de la copa y el punto de contacto de esta con la base. Los alerones de la herramienta usada para hacer la ranura deberán apartar la masa de suelo en un tramo de 1 ½” cuando el platillo esté lleno adecuadamente.

En las arcillas puede generalmente hacerse una ranura limpia con una sola pasada de la herramienta. Sin embargo, en los suelos limosos puede ser necesario hacer la ranura con varias pasadas de la herramienta o con una espátula, usándola herramienta para comprobar las dimensiones. Al hacer las ranuras, téngase mucho cuidado de evitar que la muestra de suelo se mueva con relación al platillo.



Fotografía 5 Copa Casagrande con el material ranurado

3. Después de asegurarse de que las partes que se golpean estén limpias, colóquese el platillo en el dispositivo y désele vuelta a la manivela a una velocidad aproximada de dos vueltas por segundo hasta que el fondo de la ranura se cierre en una distancia de $\frac{1}{2}$ pulgada. La operación de mezclado, ranurado y determinación del número de golpes que se requieren, se repiten hasta que tres determinaciones sucesivas muestren una concordancia satisfactoria. Regístrese el número de golpes por cada una de estas tres últimas determinaciones en la hoja de datos.



Fotografía 6 Determinación del número de golpes



Fotografía 7 Medición de la unión entre la parte ranurada

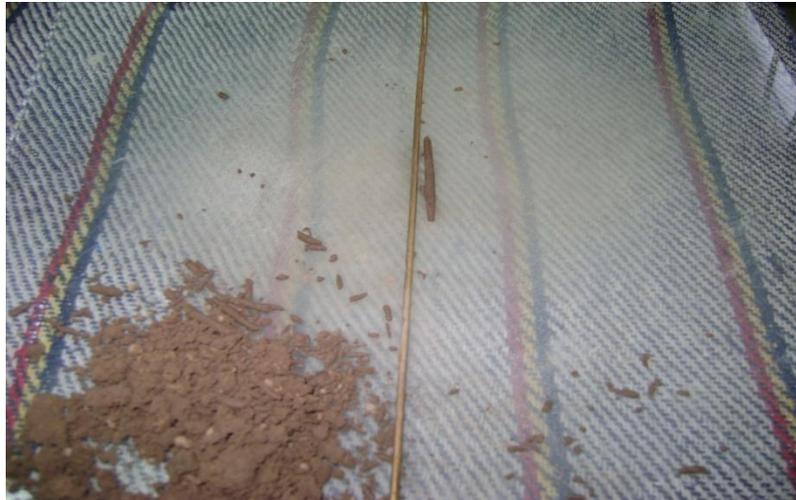
4. Póngase aproximadamente de 5 a 10 gramos de la porción de la muestra que está próxima a la ranura, en un par de vidrios de reloj.
5. Repítanse las etapas 2, 3 y 4 para obtener dos o tres puntos de la curva de fluidez entre 20 y 35 golpes, y dos o tres puntos entre 5 y 15, estimando el número de golpes con una aproximación de $\frac{1}{2}$ golpe cuando este número sea menor que 10.
Lo más conveniente es encontrar primero los puntos correspondientes a un número de golpes de cerca de 35 y después de agregar agua por medio de un gotero, para obtener la consistencia que corresponde a un número menor de golpes. Debe agregarse material adicional de la muestra preparada para reemplazar el material tomado para las determinaciones de contenido de agua.
6. Pénsese los vidrios de reloj que contienen la muestra con una aproximación de 0.001 gramos, en la balanza analítica y regístrense los pesos en la hoja de datos.
7. Quítense las abrazaderas de los vidrios de reloj, póngase el vidrio de reloj y colóquese en un horno de secado a temperatura constante, fija a temperatura de 105 ° C. las muestras deberán quedarse en el horno por lo menos 5 horas.
8. Sáquense del horno las muestras secadas, y colóquelas sobre un desecador hasta enfriarlas.
9. Pénsese los vidrios de reloj, con las muestras secadas, en una balanza analítica con una aproximación de 0.001 gramo y regístrense los pesos.
10. Calcúlense los contenidos de agua en por ciento del peso seco, a partir de la relación del peso del agua extraída por secado con el peso de la muestra seca.
11. Trácese la curva de fluidez en papel semi-logarítmico, y determínese el límite líquido como el contenido de agua correspondiente a 25 golpes.

A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos de la prueba de límite líquido para tepetate de la mina Xochiquilar.

Vidrio		Límite Líquido				Cápsula 419	
Número	Gramos	V + W _h gramos	V + W _s gramos	W _w	W _s	W %	Número de golpes
214	21.24	28.09	25.86	6.85	4.62	48.3	37
187	26.02	32.10	30.10	6.08	4.08	49	26
203	21.91	26.79	25.18	4.88	3.27	49.2	16
210	20.18	26.23	24.18	6.05	4	51.3	8

Prueba del límite plástico.

1. Tómese una muestra que, tenga aproximadamente el tamaño de un cubo de ½”, de la muestra preparada, que se uso para la determinación del límite líquido.
2. Ruédese la muestra sobre una hoja de papel limpio o una placa de vidrio, esmerilado para reducir el contenido de agua. Dóblese y ruédese, y repítase este proceso hasta que el suelo se desmorone al tratar de hacer una barra de 3 mm de diámetro. (1/8”).



Fotografía 8 Elaboración de la barra de 3mm para su límite plástico

3. Inmediatamente colóquese la muestra desmoronada en un par de vidrios de reloj, pésese en una balanza analítica con aproximación de 0.001 gramos y regístrese este peso en la hoja de datos.
El proceso descrito debe repetirse por lo menos dos veces.
4. Séquense las muestras, con los vidrios de reloj, en un horno a temperatura constante, fija a 105 ° C., por lo menos durante 5 horas.
5. Sáquese la muestra del horno, ciérrense los vidrios y colóquese en un lugar donde se puedan enfriar.
6. Péseñse los vidrios de reloj con la muestra seca, con ayuda de la balanza analítica y regístrense los pesos.

7. Calcule el contenido de agua en por ciento del peso seco, dividiendo el peso del agua extraída con el secado por el peso de la muestra seca. Por lo menos los resultados de dos determinaciones deberían corresponder con una diferencia máxima de $\pm 2 P_w/100$. Úsese el valor promedio del límite plástico, P_w .

Índices deducidos.

1. El índice de fluidez, F_w , es por definición igual a la pendiente de la curva de fluidez. Numéricamente es igual a la diferencia que hay entre el contenido de agua a los 10 y a los 100 golpes, o la diferencia entre los contenidos de agua a 1 golpe y a 10.
2. El índice de plasticidad, I_w , es la diferencia entre el límite líquido y el plástico.

$$I_w = L_w - P_w$$

3. El índice de tenacidad, T_w , es la relación índice de la plasticidad con el índice del escurrimiento:

$$T_w = \frac{I_w}{F_w}$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en la prueba de límite plástico:

vidrio		Límite Líquido				
Número	Gramos	V + W _h gramos	V + W _s gramos	W _w	W _s	W %
261	23.17	30.68	28.96	6.85	4.62	29.7
28	21.81	30.52	28.52	6.08	4.08	29.8
promedio						29.8

$$L_w = 49\%, \text{ y } P_w = 29.8\%$$

$$I_w = 49\% - 29.8\% = 19.2\%$$

Y cuya clasificación es ML (limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos y arcillosos ligeramente plásticos), es un limo de baja compresibilidad, de color café amarillento, con poca arena fina.

3.4. Densidad de sólidos

La densidad se define como la relación del peso de un volumen dado de una sustancia con el peso de un volumen igual de cualquier otra sustancia tomada como unidad. La densidad de los sólidos generalmente se refiere al agua a 4°C., y la densidad de los gases, al aire. En el campo de la mecánica de suelos, la relación es con agua a 4°C.

En mecánica de suelos se emplean los términos “densidad” y “densidad de masa”, el primero se representa S_s es igual al peso de la materia solida, w_s de una masa de suelo dividido entre ($V_s \cdot \gamma_0$), que es el peso de un volumen equivalente de agua a 4°C. El símbolo γ_0 designa el peso unitario del agua a 4°C.

La densidad de masa (densidad bruta), que se designa con el símbolo S_m , es igual al peso total (aire, agua y sólidos) W , de una masa dada de suelo, dividido entre ($V \cdot \gamma_0$), que es el peso de un volumen equivalente de agua a 4°C.

Si un suelo está completamente saturado, la densidad de masa puede determinarse indirectamente calculándola de la oquedad, e , el contenido de humedad, w , y la densidad, S_s , como sigue:

$$S_m = \frac{S_s(1 + w)}{(1 + e)}$$

En el caso de suelos parcialmente saturados, es más conveniente determinar la densidad de masa directamente. El volumen de una masa dada de suelo puede determinarse sumergiendo éste en mercurio y midiendo la cantidad de mercurio que desplaza.

La determinación directa de la densidad de un suelo, S_s , generalmente se hace por medio de un frasco volumétrico calibrado. Este es un frasco calibrado para contener, al llenarse hasta una

marca determinada grabada en su cuello, un volumen definido de líquido. Sin embargo, este volumen es una función de la temperatura.

El objeto específico de este frasco es proporcionar un medio para determinar el peso de un volumen dado de la sustancia normal (agua) a la cual se relaciona la densidad.

Al hacer pruebas de rutina no es práctico mantener constante la temperatura particular para la cual está calibrado un frasco. Por esta razón es necesario hacer una calibración de temperatura.

Calibración del Frasco Volumétrico

El peso de un frasco lleno de agua hasta una graduación dada es una función de la temperatura. Las variaciones se deben a la expansión y contracción del vidrio y a los cambios de densidad del agua misma.

El procedimiento seguido para obtener una curva de calibración de temperatura consiste en determinar el peso del frasco, W_b , el peso del frasco lleno de agua a cualquier temperatura T_1 , W'_{bw} , y el coeficiente de expansión volumétrica del frasco, a_c .

El peso del frasco lleno de agua a cualquier temperatura T_1 , W'_{bw} se toma como el promedio de cinco determinaciones de este peso a la temperatura del cuarto. El coeficiente de expansión volumétrica del frasco se obtiene determinando W''_{bw} , peso del frasco lleno de agua a una temperatura T_2 , por lo menos 10° más alta que T_1 . Habiendo determinado estas cantidades el coeficiente de expansión volumétrica, a_c , puede expresarse como sigue:

$$a_c = \frac{1}{T_1 - T_2} \cdot \frac{\gamma'_{T_1}}{\gamma''_{T_2}} \cdot \frac{W''_{bw} - W'_{bw}}{W'_{bw} - W_b}$$

En donde: γ'_{T_1} es la densidad del agua correspondiente a T_1 y γ''_{T_2} es la densidad del agua correspondiente a T_2 . La densidad del agua γ_T , es una función de la temperatura.

El peso W_{bw} del frasco más el agua a cualquier otra temperatura T , se puede expresar en función de las cantidades W_b , W'_{bw} , T , T_1 , y a_c determinadas como se describió arriba:

$$W_{bw} = W_b + (W'_{bw} - W_b) \cdot \frac{\gamma_T}{\gamma'_{T_1}} [1 + a_c \cdot (T - T_1)]$$

La curva de calibración deseada es la gráfica obtenida tomando como coordenadas la temperatura y los valores de W_{bw} .

Aparatos. Un frasco volumétrico Pyrex con capacidad de 500 cé., termómetro con divisiones de 0.1 °C., graduado de 0° a 50°C., balanza, gotero, agua destilada, solución para limpiar cristalería, alcohol para limpiar, y éter.

Procedimiento.

1. Obténgase el peso seco del frasco, W_b , con una aproximación de 0.01 g. en una balanza de laboratorio. Regístrese este peso en la Hoja de Datos.
Para limpiar el frasco, enjuáguese con solución para limpiar cristales. Después de enjuagarlo, póngase de nuevo la solución en la botella, y enjuáguese el frasco perfectamente con agua de la llave. Para secar el frasco con rapidez, sacúdase el agua que sea posible y después enjuáguese con alcohol. Este disolverá el agua que queda en el frasco. Sacúdase todo el alcohol que sea posible, y enjuáguese cuidadosamente con una pequeña cantidad de éter. El éter disolverá el alcohol que quede en el frasco. Póngase el

frasco boca abajo durante unos 15 ó 20 minutos. Los vapores del éter, siendo más pesados que el aire, se escapan rápidamente, dejando seco el frasco.

Precaución: El éter es altamente inflamable y explosivo. ¡Apáguese todas las flamas cuando se use! No fume.

2. Llénese el frasco con agua destilada, agregando las últimas gotas con un gotero, hasta que el fondo del menisco coincida con marca del cuello.
3. Después de asegurarse de que el exterior del frasco esté seco y de que no queda agua adherida en el interior del cuello, arriba de la graduación, pésese el frasco más el agua, W'_{bw} , con una aproximación de 0.01 g. en una balanza de laboratorio y anótese el peso en la Hoja de Datos.
4. Inmediatamente después de pesar, determínese la temperatura del agua contenida en el frasco sumergiendo un termómetro hasta la mitad del mismo. Regístrese la temperatura, T_1 , con una aproximación de 0.1° C.
5. Repítanse las etapas 2, 3 y 4, cinco veces y regístrese el promedio de los valores del T_1 Y W'_{bw} en las columnas correspondientes.
6. Después colóquese la botella, llena de agua hasta la altura de la graduación, aproximadamente, en un baño de María cuya temperatura sea cuando menos 10°C. Más alta que la del ambiente.
7. Después de que la temperatura del agua del frasco haya alcanzado la temperatura del baño de María, T_2 ajústese el nivel del agua del frasco hasta que coincida con la marca de graduación, y quítese el agua que esté adherida al interior del cuello, arriba de la graduación. Regístrese la temperatura, T_2 .
8. Quítese el frasco del baño de María, séquese cuidadosamente el exterior, y pésese en una balanza de laboratorio. Regístrese este peso, W''_{bw} en la Hoja de Datos.
9. Repítanse las etapas 6, 7 Y 8 cuando menos tres veces y calcúlese el coeficiente de expansión volumétrica del frasco a_c correspondiente a cada uno de estos valores W''_{bw} , como se explica en la Hoja de Datos.
10. Usando el promedio de los valores del coeficiente de expansión volumétrica, a_c determinado en la etapa 9, y el promedio del peso del frasco lleno de agua a la temperatura ambiente, T_1 determinado en la etapa 5, calcúlese el peso del frasco, W_{bw} a otras temperaturas, T, llenando la tabla que para el efecto se proporciona al calce de la Hoja, de Datos.
Prepárese una curva de calibración que muestre la relación que existe entre la temperatura y los pesos correspondientes del frasco lleno de agua. Se muestra una curva de calibración típica.

Debe tenerse en cuenta que la presencia de aire disuelto en el agua destilada usada en la calibración de un frasco, no afecta los resultados. En una solución verdadera, las moléculas de la substancia disuelta penetran la estructura de las moléculas del solvente sin ocasionar un aumento en el volumen de éste. El peso total de la solución es la suma de los pesos combinados de sus dos constituyentes; en el caso considerado, el peso del aire es prácticamente cero para los fines propuestos, de modo que su presencia, cuando está disuelto, no introduce ningún cambio ni en el peso ni en el volumen del agua. En la prueba de densidad es necesario expulsar todo el aire contenido en la muestra de suelo, pero no tiene caso el tratar de expulsar el aire disuelto en el agua destilada que se le agrega al suelo.

Determinación de la Densidad

Usando un frasco volumétrico calibrado, la densidad S_s , se determina como sigue:

Si.

W_s = Peso seco de la materia sólida.

W_{bws} = Peso del frasco con agua a la temperatura T, más los sólidos.

W_{bw} = Peso del frasco con agua solamente, a la temperatura T (obtenida de la curva de calibración).

Entonces:

$$S_s = \frac{W_s}{(W_s + W_{bw}) - W_{bws}}$$

El denominador de esta ecuación es igual al peso del agua desplazada por el sólido. Existe un error en el hecho de que, en este método, la densidad está referida al agua a 20°C., en lugar de 4°C. El error en que se incurre puede examinarse como sigue: En la expresión.

$$S_s = \frac{W_s}{W_s + W_{bw} - W_{bws}}$$

Denominador representa el peso del volumen de agua que desplaza la muestra a la temperatura de calibración, 20°C. Este volumen de agua tendría un peso diferente a 4°C., que es la temperatura tomada como normal para la densidad. El error en el valor de la densidad es de 0.002, que se puede despreciar en las pruebas de rutina.

Teniendo ya una curva de calibración para el peso del frasco con agua, W_{bw} , sólo falta hacer la determinación de W_s y W_{bws} .

APARATOS. Frasco volumétrico calibrado de 500 cc., termómetro con divisiones de 0.1°C. desde 0 hasta 50°C., bomba de vacío, baño de glicerina, embudo de vidrio, agua destilada, batidora mecánica, cápsula (215 mm. de diámetro), espátula, balanza de laboratorio y gotero.

Procedimiento.

- A. Para suelos sin cohesión, secados al horno:
 1. Pésene aproximadamente 80 g. de suelo secado al horno, con una aproximación de 0.01 g.; regístrese el peso, W_s , en la Hoja de Datos.



Fotografía 9 Colocación y pesado del material con el matraz

2. Con la ayuda de un embudo, viértase cuidadosamente esta muestra en un frasco volumétrico calibrado y agréguese suficiente agua destilada para llenarlo hasta la mitad.



Fotografía 10 Vertido de agua destilada al material contenido en el matraz



Fotografía 11 Llenado de agua hasta la mitad del matraz

3. Por medio de la bomba de vacío hágase el vacío en el frasco que contiene el suelo y el agua, durante 15 minutos aproximadamente, a fin de extraer cualquier cantidad de aire que haya quedado aprisionado. Rodando cuidadosamente la botella de vez en cuando, se hará más expedito este proceso.



Fotografía 12 Sistema de vacío para poder extraer el aire atrapado



Fotografía 13 Extracción del aire contenido en los matraces

4. a) Agréguese cuidadosamente suficiente agua destilada para el nivel de la suspensión apenas llegue a la base del cuello de la botella, y hágase otra vez el vacío para comprobar si se ha expulsado completamente el aire. Aunque ocurra cierta ebullición, la superficie de la suspensión permanecerá substancialmente a la misma elevación que tenía antes de que se hiciera el vacío, si no hay aire. Sin embargo, en caso de no haberse extraído todo el aire, esto quedará indicado por un ascenso en la elevación de la suspensión en el cuello. Esto hará necesario repetir las etapas 1, 2 y 3.



Fotografía 14 Llenado del matraz con agua destilada hasta la base del cuello

b) Si la prueba de vacío indica que no se ha extraído el aire, esto será indicio de la presencia de materia orgánica. Por lo general, la presencia de materia orgánica se delata por el olor y también por la formación de una película oscura y aceitosa cuando el suelo se mezcla con el agua. En este caso no puede tenerse confianza en el método de vacío para extraer el aire y es necesario acudir a un método más vigoroso para extraer el contenido de gas. Esto puede hacerse hirviendo la suspensión contenida en el frasco, en un baño de glicerina durante un periodo de 30 minutos, agregándole agua destilada de vez en cuando, cuidadosamente a fin de evitar que la muestra hierva en seco. La botella siempre deberá estar llena aproximadamente hasta la mitad.

Se dejará enfriar entonces la botella a la temperatura ambiente interior, después de lo cual se continuará la prueba como se explica en el párrafo 4 a).

5. Cuando ya se haya extraído el aire de la suspensión por cualquiera de los dos métodos, agréguese agua destilada hasta que el nivel de la suspensión quede justamente abajo de la marca de calibración del cuello. Agréguese las últimas gotas con un gotero. Continúese llenando de este modo hasta que el fondo del menisco coincida justamente con la marca de calibración.



Fotografía 15 Llenado de todos los matraces con agua destilada

6. Después de asegurarse de que el exterior del frasco esté seco y de que no haya agua adherida al interior del cuello arriba de la graduación, pésese el frasco más la suspensión, con una aproximación de 0.01 g. en una balanza de laboratorio, y regístrese este peso, W_{bws} , en la Hoja de Datos



Fotografía 16 Secado del cuello matraz para evitar agua adherida

7. Inmediatamente después de pesar, determínese la temperatura de la suspensión sumergiendo un termómetro en el frasco. Regístrese la temperatura con una aproximación de 0.10°C .



Fotografía 17 Medición de la temperatura de la suspensión



Fotografía 18 Pesaje de la suspensión del material con el agua destilada

8. Calcúlese la densidad por medio de la fórmula:

$$S_s = \frac{W_s}{W_s + W_{bw} - W_{bws}}$$

Para nuestro suelo es de tipo cohesivo

B. Para suelos con cohesión:

- 1 Pésese una cantidad suficiente de suelo húmedo que tenga aproximadamente 80 g. de sólidos, teniendo en cuenta el contenido de agua.
- 2 Colóquese la muestra en una cápsula y mézclase con agua destilada hasta formar una pasta uniforme.
- 3 Colóquese en una batidora mecánica, agréguese agua hasta formar aproximadamente 250 cc. de suspensión, y agítese durante 15 minutos. Procédase como se describe en los párrafos 2 a 7, que se refieren a suelos secos, sin cohesión.
- 4 Pásese todo el contenido del frasco a una cápsula grande, usando agua de la llave para enjuagar, y séquese a una temperatura de 105°C. para obtener el peso de los sólidos secos, W_s . El tiempo requerido para el secado dependerá de varios factores, incluyendo la cantidad de material que debe secarse, el contenido del horno, etc. El secado no deberá ser de menos de 12 horas.
- 5 Calcúlese la densidad de la fórmula:

$$S_s = \frac{W_s}{(W_s + W_{bw}) - W_{bws}}$$

En este método de determinar la densidad de los suelos influye mucho la presencia del aire adherido a las partículas de suelo. Por lo tanto, es muy importante que se tenga especial cuidado de cerciorarse de que se haya extraído por completo.

Si se tiene cuidado al calibrar el frasco volumétrico, es muy posible obtener un valor, para el volumen de agua contenida en el frasco a la temperatura de calibración, del orden de 500.00 + 0.03 cc., como promedio de cinco ensayos. Si la temperatura se lee con una aproximación de 0.10°C. y las pesadas se hacen con una aproximación de 0.01 g., Ss tendrá un valor de 2.700 + 0.005, que es evidentemente correcto hasta la tercera cifra significativa.

Los resultados obtenidos de acuerdo a la prueba de densidad de sólidos se expresan a continuación:

Número de matraz PIC	Temperatura °C	PIC + W _w G	PIC + W _w + W _s g	W _{bws} g	W _{bw} g	W _s g	V _s cm ³	S _s
2	23.8	183.09	232.58	687.53	657.52	49.49	19.48	2.54