

2.2 SUELOS

En el diseño de pavimentos, es fundamental conocer algunas propiedades de los suelos que nos permiten conocer sus características generales y sus comportamientos.

Algunas de estas propiedades se obtienen mediante las pruebas que se describen a continuación:

a). Plasticidad

La plasticidad es la propiedad que presentan los suelos de poder deformarse, hasta cierto límite, sin romperse. Por medio de ella se mide el comportamiento de los suelos en todas las épocas. Las arcillas presentan esta propiedad en grado variable. Para conocer la plasticidad de un suelo se hace el uso de los límites de Atterberg.

Estos límites son: Limite Líquido (LL), Limite Plástico (LP) y Limite de Contracción (LC) y mediante ellos se puede conocer el tipo de suelo en estudio. Todos los límites de consistencia se determinan empleando suelo que pasa por la malla No. 40. La diferencia entre los valores del límite líquido y del límite plástico da como resultado el índice plástico (IP) del suelo.

1. Límite Líquido.

El límite líquido se define como el contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra, con el cual el suelo cambia del estado líquido al plástico. De esta forma, los suelos plásticos tienen en el límite líquido una resistencia muy pequeña al esfuerzo de corte y según Atterberg es de 25 g/cm^2 . Para determinar el límite líquido de un suelo se hace el siguiente procedimiento.

- a) Se toman unos 100 g de material que pasa la malla No 40, se colocan en una cápsula de porcelana y con una espátula se hace una mezcla pastosa, homogénea y de consistencia suave agregándole una pequeña cantidad de agua durante el mezclado.
- b) Se coloca una poca de esta mezcla en la copa de Casagrande, formando una masa alisada de un espesor de 1 cm en la parte de máxima profundidad.
- c) El suelo colocado en la copa de Casagrande se divide en la parte media en dos porciones, utilizando un ranurador.
- d) Se acciona la copa a razón de dos golpes por segundo, contando el número de golpes necesarios para que la parte inferior del talud de la ranura hecha se cierre precisamente a 1.27 cm ($1/2''$). Si no se cierra entre los 6 y 35 golpes, se recoge el material y se le añade agua y se vuelve a mezclar.
- e) Cuando se ha obtenido un valor consistente del número de golpes, comprendido entre 6 y 35 golpes, se toman 10 g aproximadamente de suelo de la zona próxima a la ranura cerrada y se determina el contenido de agua de inmediato. Se repite el ensaye y si se obtiene el mismo número de golpes que el primero o no hay diferencia en más de un golpe, se repite el ensaye hasta que tres ensayes consecutivos den una conveniente serie de números.
- f) Se repiten los pasos del 2 al 5, teniendo el suelo otros contenidos de humedad. De este modo se deben tener, por lo menos, dos grupos de dos a tres contenidos de humedad, uno entre los 25 y 35 golpes y otro entre los 6 y los 10 golpes con el fin de

que la curva de fluidez no se salga del intervalo en que puede considerarse recta, según lo indica Casagrande.

- g) Se unen los tres puntos marcados por el intervalo de 6 a 20 golpes con una línea recta y se señala el punto medio. Se repite para los dos o tres puntos dentro del intervalo de 25 a 35 golpes.
- h) Se conectan los puntos medios con una línea recta que se llama curva de fluidez. El contenido de humedad indicado por la intersección de esta línea a 25 golpes es el límite líquido del suelo.

2. Límite Plástico.

Es el contenido de humedad, expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra secada al horno, para el cual los suelos cohesivos pasan de un estado semisólido a un estado plástico. El límite plástico se determina con el material sobrante del límite líquido y al cual se le evapora humedad por mezclado hasta obtener una mezcla plástica que sea moldeable. Se forma una pequeña bola que deberá rodillarse enseguida aplicando la suficiente presión a efecto de formar filamentos.

Cuando el diámetro del filamento resultante sea de 3.17 mm (1/8") sin romperse, se debe de continuar hasta que cuando al rodillar la bola de suelo se rompa el filamento al diámetro de 1/8" se toman los pedacitos, se pesan, se secan al horno en un vidrio, vuelven a pesarse ya secos y se determina la humedad correspondiente al límite plástico.

$$L.P. = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

P_s

L.P. = Humedad correspondiente al límite plástico en %

P_h = Peso de los filamentos húmedos en gramos

P_s = Peso de los filamentos secos en gramos.

b). Prueba Proctor.

La prueba Proctor se refiere a la determinación del peso por unidad de volumen de un suelo que ha sido compactado por el procedimiento definido para diferentes contenidos de humedad. Su objetivo es:

Determinar el peso volumétrico seco máximo $\gamma_{m\acute{a}x}$ que puede alcanzar un material, así como la humedad óptima w_o que deberá hacerse la compactación.

Determinar el grado de compactación alcanzado por el material durante la construcción o cuando ya se encuentran construidos los caminos, relacionando el peso volumétrico obtenido en el lugar con el peso volumétrico máximo Proctor.

La prueba Proctor está limitada a los suelos que pasen totalmente la malla No 4, o que cuando mucho tengan un retenido de 10 % en esta malla, pero que pase dicho retenido totalmente por la malla 3/8". Cuando el material tenga retenido en la malla 3/8" debe determinarse la humedad óptima y el peso volumétrico seco máximo con la prueba de Porter estándar. También debe efectuarse la prueba Porter estándar en arenas de río, arenas de minas, arenas producto de trituración, tezontles arenosos y en general en todos aquellos materiales que carezcan de cementación.

Procedimiento:

Se obtienen 3 kg de material previamente secado al sol. Se tamiza por la malla No 10, y los grumos que se hayan retenido se disgregan perfectamente y se vuelve a tamizar por la misma malla, continuándose este proceso hasta que las partículas que se retengan en la malla no se puedan disgregar. Terminada esta operación se mezcla perfectamente todo el material y se adiciona el material y se adiciona la cantidad de agua necesaria para iniciar la prueba. La cantidad de agua que se adiciona deberá ser la necesaria para que una vez repartida uniformemente presente el material una consistencia tal que al ser comprimido en la palma de la mano no deje partículas adheridas a ella ni la humedezca, y que a la vez el material comprimido pueda tomarse con dos dedos sin que se desmorone.

El material que contiene ya la humedad necesaria para iniciar la prueba se tamiza por la malla No 4, se mezcla para homogeneizarlo y se compacta en el molde cilíndrico en tres capas aproximadamente iguales.

El pisón metálico de 2.5 kg se deja caer desde una altura de 30 cm. Deberán de darse 30 golpes repartidos uniformemente para apisonar cada capa. Una vez apisonada la última capa se remueve la extensión y se elimina el excedente de material del molde cilíndrico y se pesa éste con todo y su contenido. A continuación se extrae la muestra compactada del cilindro y se pone a secar una pequeña cantidad del corazón de la muestra para determinar su humedad.

La muestra que ha sido removida del molde cilíndrico se desmenuza hasta que pasa la malla No 4, se añaden 60 cc (2% en peso de agua) y se repite el procedimiento descrito. Esta serie de determinaciones continúan hasta que la muestra esté muy húmeda y se presente una disminución apreciable en el peso del suelo compactado.

El peso volumétrico húmedo para cada contenido de humedad se calcula con la siguiente fórmula:

$$\gamma_h = \frac{P_h}{V_t}$$

γ_h = Peso volumétrico húmedo en g/cm³

P_h = Peso del material húmedo compactado en el molde, en gramos.

V_t = Volumen del molde en cm³

El contenido de humedad se calcula con la siguiente fórmula

$$w = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

El peso volumétrico seco para cada peso volumétrico húmedo y su correspondiente humedad se calculan por la siguiente fórmula:

$$\gamma_s = \frac{\gamma_h}{1 + \frac{w}{100}}$$

w = Contenido de la humedad en porcentaje

P_w = Peso de la muestra húmeda, en gramos

P_s = Peso de la muestra seca, en gramos

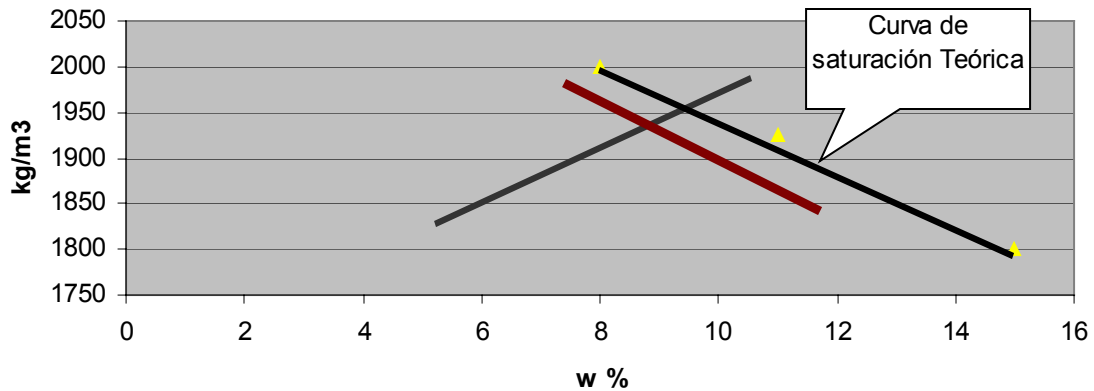
γ_s = Peso volumétrico seco, en g/cm^3

γ_h = Peso volumétrico húmedo, en g/cm^3

Los peso volumétrico secos y las humedades correspondientes se utilizan para trazar la curva peso volumétrico seco - humedad, marcando en el eje de las abscisas los contenidos de humedad. La humedad que genera mayor peso volumétrico es la que permite la mayor compactación del material y se le conoce como humedad óptima de compactación.

En la misma gráfica se dibuja la curva de saturación teórica. Esta curva representa la humedad para cualquier peso volumétrico, que sería necesaria para que todos los vacíos que dejan entre sí las partículas sólidas estuvieran llenos de agua.

Prueba Proctor



El peso volumétrico seco correspondiente a la curva de saturación teórica para la humedad dada se calcula con la fórmula:

$$\gamma_{scs} = \frac{100 D_a}{100 + wD_r} \times 100 \text{ (kg / m}^3\text{)}$$

γ_{scs} = Peso volumétrico seco de la curva de saturación (kg / m³)

D_a = Densidad absoluta del material que pasa la malla No 400 en g/cm³

D_r = Densidad relativa del material que pasa por la malla No 40

La curva de saturación teórica tiene por objeto comprobar si la prueba Proctor fue correctamente efectuada, ya que la curva de saturación y la curva Proctor nunca deben cortarse dado que es imposible en la práctica llenar totalmente con agua los huecos que dejan las partículas del suelo compactado.

La curva de saturación teórica sirve para determinar si un suelo, en el estado en que se encuentra en el lugar, es susceptible de adquirir mayor humedad o mayor peso volumétrico fácilmente.

Así, una vez hecha la determinación del peso volumétrico y humedad en el lugar se calcula el porcentaje de huecos llenos de aire con la siguiente fórmula:

$$Va = \frac{\gamma_{scs} - \gamma_s}{\gamma_s} \times 100$$

Va = Volumen de huecos llenos de aire %

γ_{scs} = Peso volumétrico seco de suelo compactado correspondiente a la humedad w

γ_s = peso volumétrico de la curva de saturación teórica correspondiente a la humedad w

Si este valor es mayor de 6.5%, el suelo se encuentra en condiciones de adquirir un peso volumétrico mayor con la humedad que contiene, o bien, sin variar su peso volumétrico seco, incrementar su humedad.

c). Prueba Porter Estándar.

Esta prueba tiene como finalidad determinar el peso volumétrico seco máximo de compactación Porter y la humedad óptima en los suelos con material mayor de 3/8" y los cuales no se les puede hacer la prueba Proctor. Esta prueba sirve también para determinar la calidad de los suelos en cuanto a valor de soporte se refiere, midiendo la resistencia a la penetración del suelo compactado y sujeto a un determinado periodo de saturación.

Esta prueba se lleva a cabo de la siguiente forma:

La humedad óptima de Porter es la humedad mínima requerida por el suelo para alcanzar su peso volumétrico seco máximo cuando es compactado con una carga unitaria de 140.6 kg/cm^2 . Para obtener la humedad óptima y el peso volumétrico seco máximo se obtiene una muestra de 4 kg de material secado, disgregado y cuarteado. Cuando se ha logrado la disgregación de los grumos se tamiza la muestra por la malla $\frac{3}{4}$ ". Se le incorpora cierta cantidad de agua, cuyo volumen se anota, y una vez lograda la distribución homogénea de la humedad se coloca en tres capas dentro del molde de prueba, y cada una de ellas se les da 25 golpes con la varilla metálica. Al terminar la colocación de la última capa se compacta el material aplicando cargas uniformes y lentamente procurando alcanzar la presión de 140.6 kg/cm^2 en un tiempo de 5 minutos, la que debe mantenerse durante 1 minuto, e inmediatamente hacer la descarga en otro minuto.

Si al llegar a la carga máxima no se humedece la base del molde, la humedad de la muestra es inferior a la óptima. A otra porción de 4 kg de material se le adiciona una cantidad de agua igual a la anterior más 80 cc y se repite el proceso. Si al aplicar la

carga máxima se observa que se humedece la base del molde, el material muestra una humedad ligeramente mayor que la óptima de Porter. Para fines prácticos es conveniente considerar que el espécimen se encuentra con su humedad óptima cuando se inicia el humedecimiento de la base del molde, siendo esta la más adecuada para su compactación.

Se determina la altura del espécimen restando la altura entre la cara superior de éste y el borde del molde de la altura total del molde, y con este dato se calcula el volumen del espécimen. Se pesa el espécimen con el molde de compactación, se le resta el peso del molde y se calcula el peso volumétrico.

$$\gamma_h = \frac{P_h}{V_t}$$

γ_h = Peso volumétrico húmedo, en g/cm³ o kg/m³

P_h = Peso del material húmedo compactado dentro del cilindro Porter, en gr o Kg

V_t = Volumen del espécimen en cm³ o m³

Se extrae el material del molde y se pone a secar a una temperatura constante de 100 a 110 °C hasta peso constante. Se deja enfriar el material y se pesa y se calcula la humedad y el peso volumétrico seco máximo.

$$w = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

$$Y_s = \frac{Y_h}{1 + \frac{w}{100}}$$

d). Valor Relativo de Soporte

Es un índice de resistencia al esfuerzo cortante en condiciones determinadas de compactación y humedad, y se expresa como el tanto por ciento de la carga necesaria para introducir un pistón de sección circular en una muestra de suelo, respecto a la profundidad de penetración del pistón en una piedra tipo triturada. Por lo tanto, si P_2 es la carga en kg necesaria para hacer penetrar el pistón en el suelo en estudio, y $P_x=1360$ kg, la precisa para penetrar la misma cantidad en la muestra tipo de piedra triturada, el valor Relativo de Soporte del suelo es de

$$VRS = (P_2/1360) * 100$$

e). Módulo de Reacción (k)

Es una característica de resistencia que se considera constante, lo que implica elasticidad del suelo. Su valor numérico depende de la textura, compacidad, humedad y otros factores que afectan la resistencia del suelo. La determinación de k se hace

mediante una placa circular de 30" de diámetro bajo una presión tal que produzca una deformación del suelo de 0.127 cm (0.05"). En general se puede decir que el módulo de reacción k es igual al coeficiente del esfuerzo aplicado por la placa entre la deformación correspondiente producida por este esfuerzo.

Mas adelante se hace referencia a esta propiedad tan importante para el diseño de pavimentos.

DIVISIÓN MAYOR		Símbolo	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO		
SUELO DE PARTICULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 ~	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4 PARA CLASIFICACION VISUAL PUEDE USARSE 1/2 CM COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4)	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco ó nada de finos	<p>DETERMINESE LOS PORCENTAJES DE GRAVA Y ARENA DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA, DEPENDIENDO DEL PORCENTAJE DE FINOS (Fracción que pasa por la malla No. 200). LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE: Menos del 5%: GW, GO, SW, SP. Más de 12%: Casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.**</p> <p>Coeficiente de uniformidad Cu: mayor de 4. Coeficiente de curvatura Cc: entre 1 y 3. $Cu = (D60/D10)$ $Cc = [(D30)^2 / (D10 \times D60)]$</p> <p>NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW</p> <p>Límites de Atterberg abajo de la "línea A" ó I.P. menor que 4 Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.</p> <p>Límites de Atterberg arriba de la "línea A" ó I.P. mayor que 7</p> <p>$Cu = (D60 / D10)$ mayor que 6 $Cc = [(D30)^2 / (D10 \times D60)]$ entre 1 y 3</p> <p>No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW</p> <p>Límites de Atterberg abajo de la "línea A" ó I.P. menor que 4 Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.</p> <p>Límites de Atterberg arriba de la "línea A" ó I.P. mayor que 7</p>		
		GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco ó nada de finos			
		P GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo.			
		d u				
		GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla.			
		SUELO DE PARTICULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 ~	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4 ARENAS CON LIMPIAS (Poco apreciable de partículas finas)		SW	Arenas bien graduadas, arenas con gravas con poco ó nada de finos
					SP	Arenas mal graduadas, arenas con gravas con poco ó nada de finos
					s SM	Arenas limosas, mezclas de arenas y limo.
					d u	
					SC	Arenas arcillosas, mezclas arenas y arcilla.
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS	LIMOS Y ARCILLAS Límite-líquido menor de 50 LIMOS Y ARCILLAS Límite-líquido mayor de 50	ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos ó arcillosos ligeramente plásticos			
		CL	Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres			
		OL	Limos inorgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad			
		MH	Limos inorgánicos, limos micaceos ó diatomaceos, limos elásticos			
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.			
		OH	Arcillas orgánicas ó alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad			
		PI	Turbas y otros suelos altamente orgánicos			
EQUIVALENCIA DE SÍMBOLOS G = Gravas, M = Limo, O = Suelos orgánicos; W = Bien graduados. S = Arenas; C = Arcilla; P.I. = Turbo; P = Mal graduados; L = Baja compresibilidad; H = Alta compresibilidad.						
<p>CARTA DE PLASTICIDAD Para la Clasificación de Suelos en Partículas Finas en el Lab.</p> <p>The figure is a graph with 'ÍNDICE PLÁSTICO' on the vertical axis (0 to 60) and 'LÍMITE LÍQUIDO' on the horizontal axis (0 to 100). A diagonal line labeled 'LINEA A' represents the relationship I.P. = 0.73 (L.L. - 20). The graph is divided into several regions: CL (Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad), CH (Arcillas inorgánicas de alta plasticidad), OL (Limos inorgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad), OH (Arcillas orgánicas ó alta plasticidad), MH (Limos inorgánicos, limos micaceos ó diatomaceos, limos elásticos), and a region for 'SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS' (PI) below the A-line. The regions are labeled with their respective soil symbols.</p>						

** Clasificación de frontera -Los suelos que poseen las características de dos grupos se designan con la combinación de los dos símbolos. Por ejemplo GW-GC, mezcla de arena y grava bien graduadas con cementante arcilloso.

~ Todos los tamaños de las mallas en esta carta son los U.S. Standard

* La subdivisión de los grupos GM y SM en subdivisiones d, y u. Son para caminos y aeropuertos únicamente, la subdivisión esta basada en los límites de Atterberg. El sufijo d se usa cuando L.L. es de 28 ó menos y el I.P. es de 6 ó menos. El sufijo u es usado cuando el L.L. es mayor que 28

FIGURA 2.2-1 Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), incluyendo su identificación y descripción.