



2.3.2.2 Granulometría y tamaño de las partículas

Al igual que los límites de Atterberg, la distribución granulométrica de la zona de arcillas blandas presenta un aspecto típico de una formación lacustre. Las capas con mayor contenido de material arcilloso (partículas inferiores a $2\ \mu\text{m}$) se encuentran en la superficie. Este valor puede llegar hasta un máximo de 70 % y disminuye progresivamente con la profundidad hasta un valor promedio de 10 %.

En la zona de suelos duros y en la zona de piedemonte se encuentran intercalaciones de arena y arcillas duras que dificultan poner en evidencia cualquier variación del tamaño de las partículas con la profundidad. Esto se explica por el hecho de que su formación no es lacustre.

2.3.2.3 Contenido de materia orgánica

El valor de la materia orgánica se determinó por los métodos usuales de laboratorio. En los materiales que predominan en la zona de suelos blandos existe un alto contenido de materia orgánica cuya presencia se explica por el origen lacustre de esta zona y por las condiciones paleoclimáticas. Puesto que esta característica modifica de una manera importante las propiedades mecánicas de los suelos y diferencia al suelo de la ciudad de Bogotá de los suelos estudiados por diferentes autores en diferentes partes del mundo, se consideró conveniente estudiar la variación de este parámetro en la zona de suelos blandos.

En la Figura 2.11 se representa la variación de este parámetro en toda la zona blanda. Se observa que el

contenido de materia orgánica disminuye a medida que aumenta la profundidad. En los primeros 30 m aparecen variaciones importantes, donde los valores oscilan entre 8 y 30 % con intercalaciones de turba cuyo contenido de materia orgánica, expresado en porcentaje con respecto a las partículas minerales, es superior al 100%.

A partir de los 30 m el contenido de materia orgánica comienza a descender paulatinamente hasta valores de alrededor del 5 % a 100 m de profundidad.

2.3.2.4 Relaciones gravimétricas y volumétricas

Una de las características básicas de los suelos que tiene una gran influencia en su comportamiento mecánico es su peso unitario. El valor de esta propiedad física depende de la densidad de las partículas minerales que forman el suelo (peso específico de sólidos) y de la proporción en que se reparten los tres componentes que forman el suelo: mineral, agua y aire.

El peso específico de sólidos de los minerales arcillosos oscila alrededor de 2.7, sin embargo en los suelos de Bogotá esta característica física es considerablemente inferior a este valor. Esta aparente discrepancia se explica por el alto contenido de materia orgánica que presenta el suelo de la ciudad. En efecto, las regresiones indican que existe una buena correlación entre el peso específico de sólidos y el contenido de materia orgánica; se observa además que para un contenido de materia orgánica cercano a cero el valor de la gravedad específica es aproximadamente 2.65 el cual corresponde al promedio de la gran mayoría de minerales arcillosos.

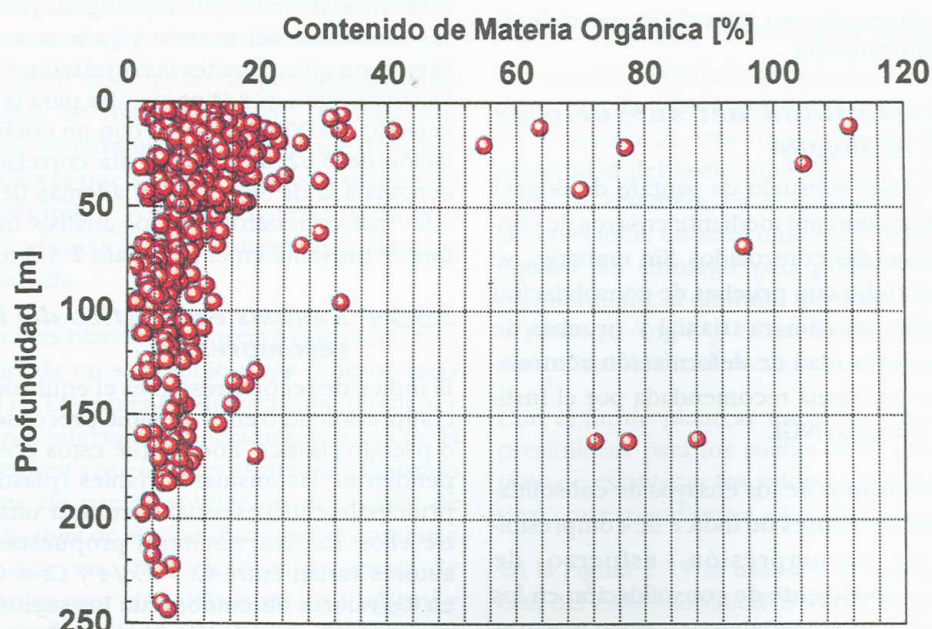


FIGURA 2.11 GRAFICO DE PORCENTAJE DE MATERIA ORGANICA EN FUNCION DE LA PROFUNDIDAD - ZONA DE ARCILLAS BLANDAS



La humedad natural de los suelos presentes en la zona blanda tiene un comportamiento típico de suelos normalmente consolidados: inmediatamente por debajo del nivel freático la humedad natural se acerca al límite líquido de tal manera que se obtienen índices de liquidez del orden del 90%, a medida que aumenta la profundidad la humedad natural disminuye paulatinamente hasta que para profundidades correspondientes a un esfuerzo efectivo vertical de 10 Kg/cm^2 su valor se acerca al límite plástico, tal como lo indican diferentes autores (Biarez et al, 1994). La humedad natural del suelo que se encuentra por encima del nivel freático disminuye considerablemente debido a los altos valores de succión derivados del fenómeno de desecación al que ha estado sometido esta capa de suelo.

El peso unitario tiene un comportamiento similar al de la humedad natural; en la superficie debido al fenómeno de desecación presenta un valor superior a 1.8 ton/m^3 y disminuye hasta 1.4 en las vecindades del nivel freático. A partir de esta profundidad el peso unitario aumenta paulatinamente debido al mayor esfuerzo efectivo vertical y a la menor compresibilidad del suelo hasta llegar a valores cercanos a 2 ton/m^3 para profundidades entre 100 y 200 m dependiendo del tipo de suelo.

El grado de saturación del suelo, inclusive en la capa localizada inmediatamente por encima del nivel freático, es cercano al 100%. Lo anterior se explica por el alto valor de la presión de succión necesario para provocar la desaturación del suelo (punto de entrada de aire) que caracteriza a los suelos de la ciudad de Bogotá. Esto no excluye que en ciertos puntos de la zona blanda se encuentren arcillas desecadas en superficie por el fenómeno de evapotranspiración.

2.3.3 Compresibilidad del subsuelo de Santafé de Bogotá

La compresibilidad del subsuelo de Santafé de Bogotá se estudió fundamentalmente mediante ensayos de consolidación con esfuerzos controlados. Sin embargo, se complementó el estudio con pruebas de consolidación isotrópica realizadas en cámara triaxial y pruebas de consolidación con velocidad de deformación controlada siguiendo la metodología recomendada por el Instituto Geotécnico Noruego NGI.

Con base en los resultados de los ensayos de consolidación se obtuvieron los valores de índice de compresibilidad, índice de recompresión, esfuerzo de preconsolidación y coeficiente de consolidación en los suelos de las zonas de la ciudad que presentan mayores problemas de compresibilidad.

2.3.3.1 Compresión isotrópica

El comportamiento de los suelos sometidos a trayectorias de carga en compresión isotrópica tiene gran importancia ya que su conocimiento permite representar las curvas esfuerzo - deformación de los suelos mediante modelos elastoplásticos. Cuando se representan las curvas de compresión isotrópica en un plano logarítmico es posible distinguir dos rectas: una en el dominio cuasi elástico y la otra en el dominio elastoplástico.

El valor del punto inicial de la recta de comportamiento cuasi-elástico y el valor del límite elástico son parámetros que no dependen del suelo sino de su estado inicial y por consiguiente no es posible correlacionarlos con propiedades índice tales como los límites de Atterberg.

2.3.3.2 Compresión unidimensional u oedométrica

En las gráficas realizadas con resultados de algunos de los ensayos realizados, se observa la siguiente tendencia, que está en acuerdo con lo reportado ampliamente en la literatura; a medida que el límite líquido aumenta, se incrementa la compresibilidad, es decir, que aumenta el índice de compresión C_c .

2.3.3.3 Análisis estadístico del índice de compresión

El índice de compresión es un parámetro de suma importancia ya que está relacionado con la magnitud de la deformación del suelo bajo cargas externas y depende principalmente de la plasticidad del suelo. En la Figura 2.12 se observa que en efecto existe una buena correlación entre el límite líquido y el índice de compresión. Esta correlación ha sido investigada por diferentes autores alrededor del mundo y la mas aceptada es la de Skempton quien plantea la correlación $C_c = 0.009(WI - 10)$. La correlación que se encuentra para la ciudad de Bogotá es $C_c = 0.0089(wl - 14)$ con un coeficiente de correlación de 0.62, algo bajo. Esta correlación es bastante cercana a la de Skempton y además tiene una justificación que concuerda con los análisis de valores límites que se presenta en el parágrafo 2.3.3.6.

2.3.3.4 Análisis estadístico del índice de recompresión

El índice de recompresión es el equivalente al índice de compresión pero en el dominio preconsolidado del suelo o pseudo-elástico. Puesto que estos dos parámetros dependen de las mismas variables (plasticidad del suelo principalmente) es usual encontrar una correlación entre ellos. Las correlaciones propuestas por diferentes autores varían entre $C_r = C_c/4$ y $C_r = C_c/10$. Con base en los valores obtenidos para los suelos investigados se encuentra la correlación $C_r = C_c/8$ con un coeficiente de correlación de 0.83.

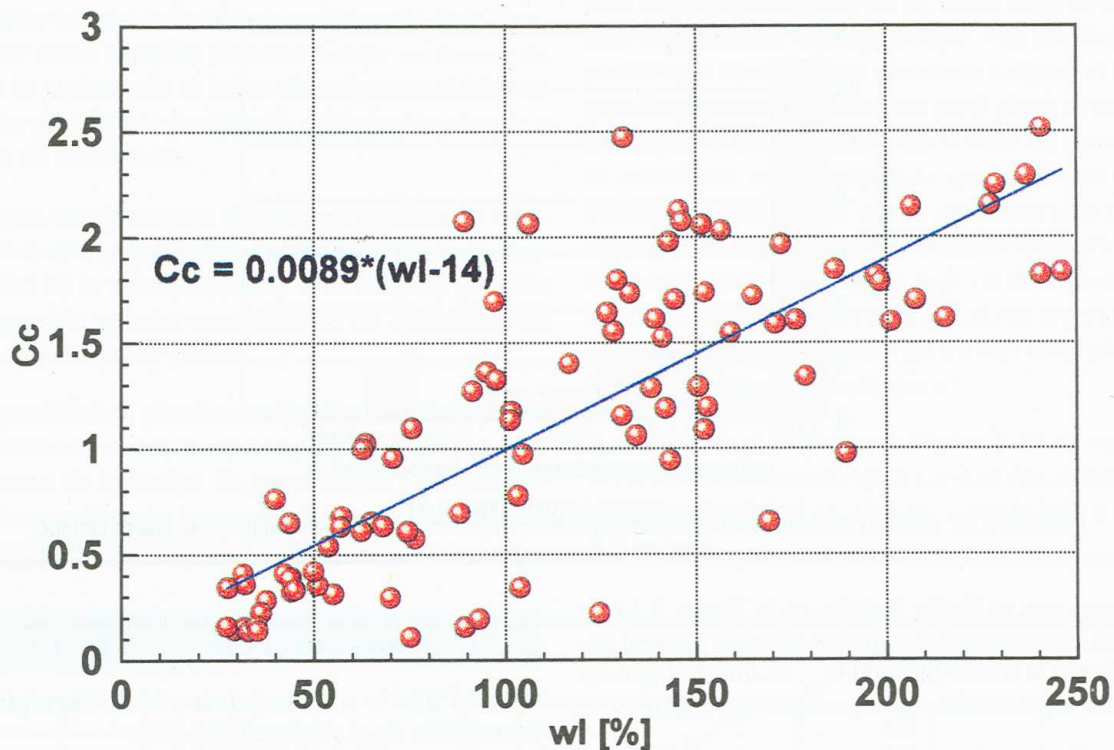


FIGURA 2.12 GRÁFICO DE ÍNDICE DE COMPRESIÓN EN FUNCIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO

2.3.3.5 Esfuerzos de preconsolidación

Tal como ya se anotó el esfuerzo de preconsolidación obtenido a partir de los ensayos de compresión unidimensional es un parámetro que depende de la historia de esfuerzos a la que se ha sometido al suelo y no de sus propiedades índice. Por tal motivo este parámetro varía con la profundidad y con la localización de la muestra de suelo estudiada.

En la zona de arcillas blandas se observa que existe una capa preconsolidada en superficie cuyo espesor varía alrededor de 10 m. La presencia de esta capa puede ser debida a esfuerzos internos de succión producto de la baja del nivel freático y/o evapotranspiración, llegando a unos esfuerzos de preconsolidación del orden de 1.5 kg/cm^2 . En la zona de arcillas duras por el contrario se encuentra que en superficie el esfuerzo de preconsolidación es muy alto, del orden de 2 kg/cm^2 y aumenta con la profundidad hasta valores del orden de 4 kg/cm^2 a los 50 m.

2.3.3.6 Análisis de valores límites

Los resultados obtenidos permiten observar que la localización y la pendiente de la curva de consolidación unidimensional está fuertemente relacionada con la plasticidad del suelo entendiendo plasticidad como límites de Atterberg. En el parágrafo 2.3.3.3 se presentó la correlación entre el índice de compresión y el límite líquido. Sin embargo, para poder localizar la recta correspondiente al dominio normalmente consolidado en el plano $(e - \log \sigma'_v)$ es necesario conocer el punto inicial o final de dicha recta.

Con el fin de plantear un modelo estadístico de compresibilidad para los suelos de la ciudad de Bogotá se trató de establecer los valores del esfuerzo efectivo vertical correspondientes a los límites líquido y plástico.

En la Figura 2.13 se muestra el histograma de frecuencias del esfuerzo efectivo vertical que corresponde al límite líquido σ_{wl} . Se observa que el valor promedio se encuentra para un valor de 0.2 kg/cm^2 .

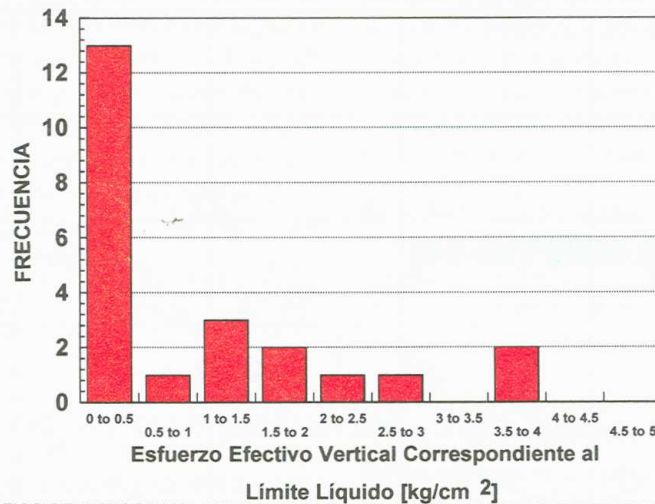


FIGURA 2.13 GRÁFICO DE HISTOGRAMA DEL ESFUERZO EFECTIVO VERTICAL CORRESPONDIENTE AL LÍMITE LÍQUIDO.

Al igual que con el límite líquido en la Figura 2.14 se muestra el histograma del esfuerzo efectivo vertical correspondiente al límite plástico σ_{wp} . Se observa que en este caso el valor medio corresponde a 24 kg/cm².

Los valores límites obtenidos concuerdan bastante bien con la correlación entre el coeficiente de compresibilidad y el límite líquido.

Tomando el valor promedio de G_s para Bogotá y utilizando la correlación encontrada entre el índice de plasticidad y el límite líquido, en la ecuación 2.3, se obtiene:

$$Cc=0.0094 (w_l - 15.2) \quad \text{Ec. 2.4}$$

relación que es muy próxima a la de Skempton y a la encontrada en el párrafo 2.3.3.3.

Con base en la correlación obtenida entre el coeficiente de compresibilidad y los puntos extremos de las rectas en el dominio normalmente consolidado es posible plantear una recta de consolidación normal de un suelo conociendo únicamente su límite líquido. En general se observa una buena correspondencia entre los resultados experimentales y el modelo propuesto.

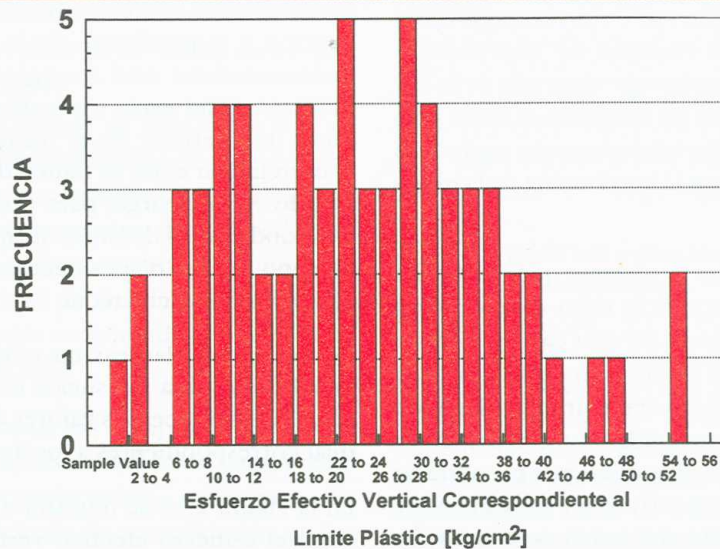


FIGURA 2.14 GRÁFICO DE HISTOGRAMA DEL ESFUERZO EFECTIVO VERTICAL CORRESPONDIENTE AL LÍMITE PLÁSTICO.