

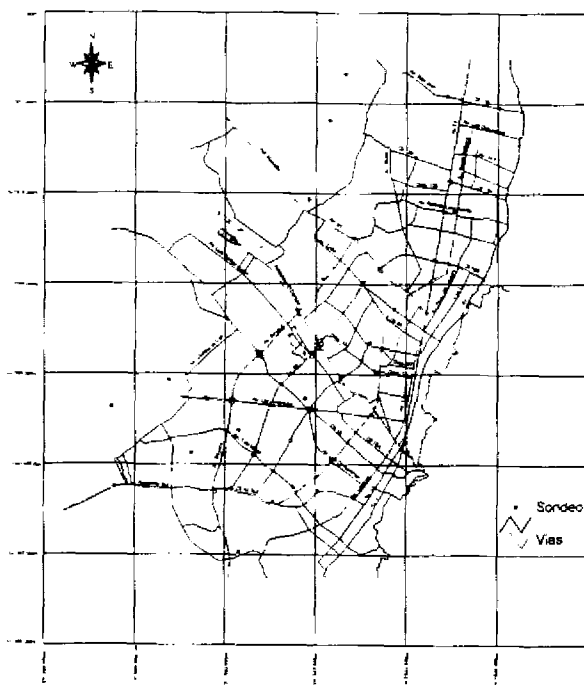


FIGURA 2.7 LOCALIZACIÓN DE LOS SONDEOS

presiómetro de Menard y de down-hole. El detalle de los resultados obtenidos se encuentran en el informe de "Ensayos de Laboratorio y Zonificación Geotécnica" (Universidad de los Andes e INGEOMINAS, 1996)

2.3.2 Propiedades básicas del subsuelo de Santafé de Bogotá

Para el análisis de las propiedades básicas del subsuelo de la ciudad se tuvieron en cuenta la totalidad de los sondeos realizados. Como ejemplo típico en la Figura 2.8 se presenta el perfil de propiedades básicas encontradas en el sondeo realizado en INGEOMINAS.

A continuación se hace una breve descripción de cada una de las propiedades básicas del subsuelo.

2.3.2.1 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg se determinaron por los métodos usuales de laboratorio. En la zona de arcillas blandas de la ciudad de Bogotá, la cual se encuentra en la parte norte de la ciudad, es posible obtener límites líquidos superiores a 200% e índices de plasticidad superiores a 100% principalmente en las capas más superficiales. Esta característica ubica al subsuelo de la ciu-

dad de Bogotá entre los suelos con mayor dificultad ingenieril en el mundo

Variación del límite líquido con la profundidad

En la zona de arcillas blandas, el perfil de variación de los límites de Atterberg con la profundidad muestra un comportamiento típico de las formaciones lacustres. En el sondeo realizado en INGEOMINAS se observa que el límite líquido pasa de un máximo de 200% en superficie hasta un mínimo de 30% en profundidad. Adicionalmente, es importante notar que la dispersión del límite líquido disminuye con la profundidad. Particularmente se encuentra que de 0 a 60 m de profundidad es posible encontrar valores que varían de 30 a más de 200%. Existen diversas explicaciones a estos fenómenos fundamentadas en el proceso de sedimentación y en los aportes de eventos volcánicos, sin embargo, es conveniente esperar los resultados de los estudios de palinología que adelanta INGEOMINAS para plantear hipótesis bien fundamentadas sobre el proceso de deposición.

Hacia el sur de la ciudad se puede identificar una zona de suelos duros en la que se encuentran principalmente dos tipos de suelo: el primero, formado por arcillas limosas secas y preconsolidadas ubicado en la parte oriental y el segundo, al occidente formado principalmente por suelos más arenosos de origen aluvial en su mayoría, que son producto del transporte de sedimentos del río Tunjuelito, entre otros. La zona arcillosa se caracteriza por su plasticidad baja a media, encontrándose el límite líquido en un rango entre 20 y 70% en los primeros 30 m, en profundidad la arcilla tiende a volverse más arenosa y presenta un límite líquido de alrededor del 30%. Adicionalmente se encuentra una capa de turba aproximadamente a 30 m de profundidad con un espesor de 4 m en promedio. La parte occidental, como ya se mencionó, se caracteriza principalmente por la presencia de arenas de grano fino a muy fino, con poca presencia de arcillas. Hacia los límites con las zonas arcillosas (la zona blanda y la zona de arcillas duras) el contenido de arcillas aumenta aunque no presentan una alta plasticidad (límite líquido alrededor de 30%). Esta diferencia en plasticidad con respecto a las otras zonas puede explicarse por una mayor influencia del transporte de sedimentos de los ríos.

En la Figura 2.9 están agrupados la totalidad de los resultados de límite líquido en función de la profundidad en la zona de arcillas blandas. En este gráfico se observan las características ya anotadas, gran dispersión en los primeros 50 m, disminución del límite líquido con la profundidad y presencia de un estrato de alta plasticidad a 160 m.

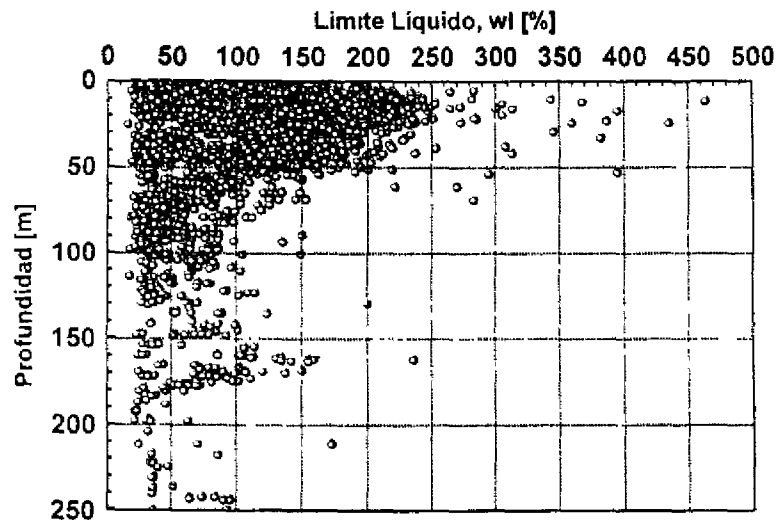


FIGURA 2.9 GRÁFICO DEL LÍMITE LÍQUIDO EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD - ZONA DE ARCILLAS BLANDAS

Correlación entre el índice de plasticidad y el límite líquido

Es conocido en geotécnia que los suelos de un mismo origen tienden a ubicarse en el gráfico de plasticidad de Casagrande en una franja bien definida, esto implica la existencia de una relación entre el índice de plasticidad y el límite líquido.

Con base en el resultado de todos los puntos estudiados es posible proponer la siguiente correlación entre el índice de plasticidad y el límite líquido para los suelos de Bogotá

$$I_p = 0.7792 \cdot (w_l - 15.2), \quad r = 0.967 \quad \text{Ec.2.3}$$

En la Figura 2.10 se presentan los resultados de los ensayos de límites líquido y plástico de la totalidad del estudio en el gráfico de plasticidad de Casagrande. Igualmente se presenta en esta figura la relación propuesta y la franja correspondiente a los suelos de Bogotá.

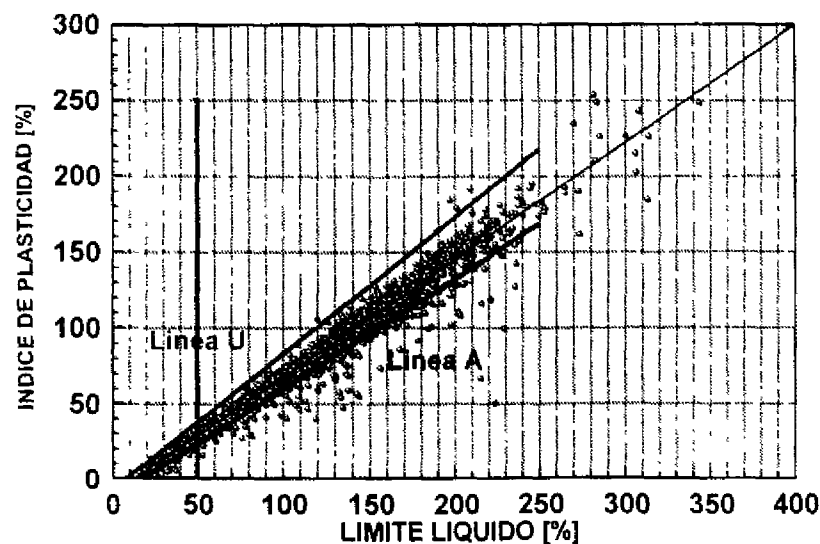


FIGURA 2.10 GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE PARA TODOS LOS SUELOS ESTUDIADOS

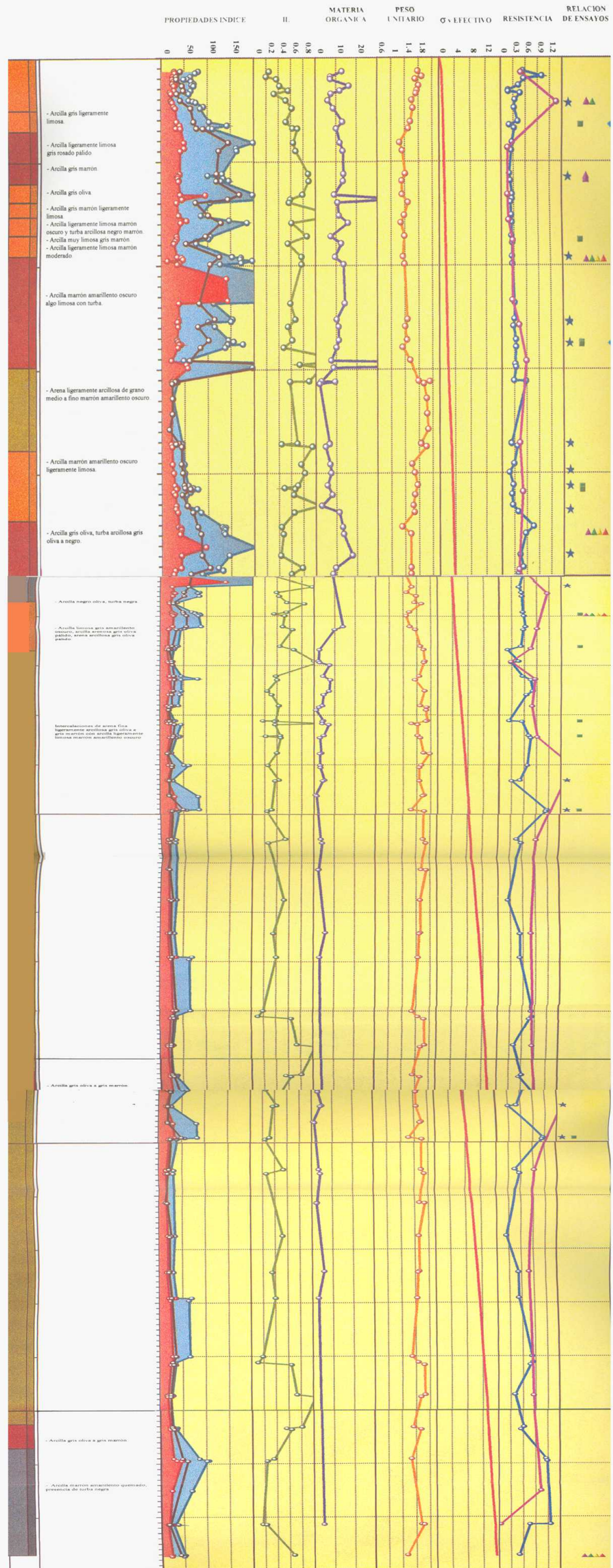


FIGURA 2.8 PERFIL ESTADÍSTICO Y ENSAYOS DE LABORATORIO. SONDEO REALIZADO EN INCEOMINAS.

II. MATERIA ORGANICA (g/100g) PESO UNITARIO (kg/m³) σ_v EFECTIVO (kg/cm²) RESISTENCIA (kg/cm²) RELACION DE ENSAYOS

CONVENCIONES

LIQUID LIMIT (LL) PLASTIC LIMIT (PL) SHREDDERED (SH) TRIAXIAL TEST (T) POINT TEST (P) TRIAXIAL TEST (T) POINT TEST (P) TRIAXIAL TEST (T) POINT TEST (P)

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.

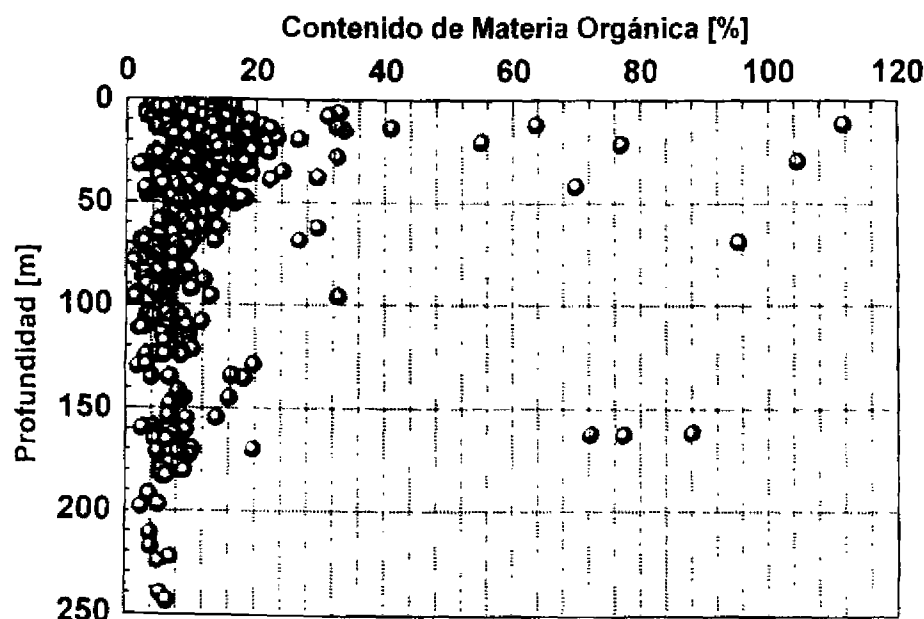


FIGURA 2.11 GRÁFICO DE PORCENTAJE DE MATERIA ORGÁNICA EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD - ZONA DE ARCILLAS BLANDAS

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 (Biazet 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 más aceptada es la de Skempton quien plantea la correlación $C_c = 0.009(W_L - 10)$. La correlación que se encuentra para la ciudad de Bogotá es $C_c = 0.0089 \cdot (w_L - 14)$ 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 párrafo 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 .

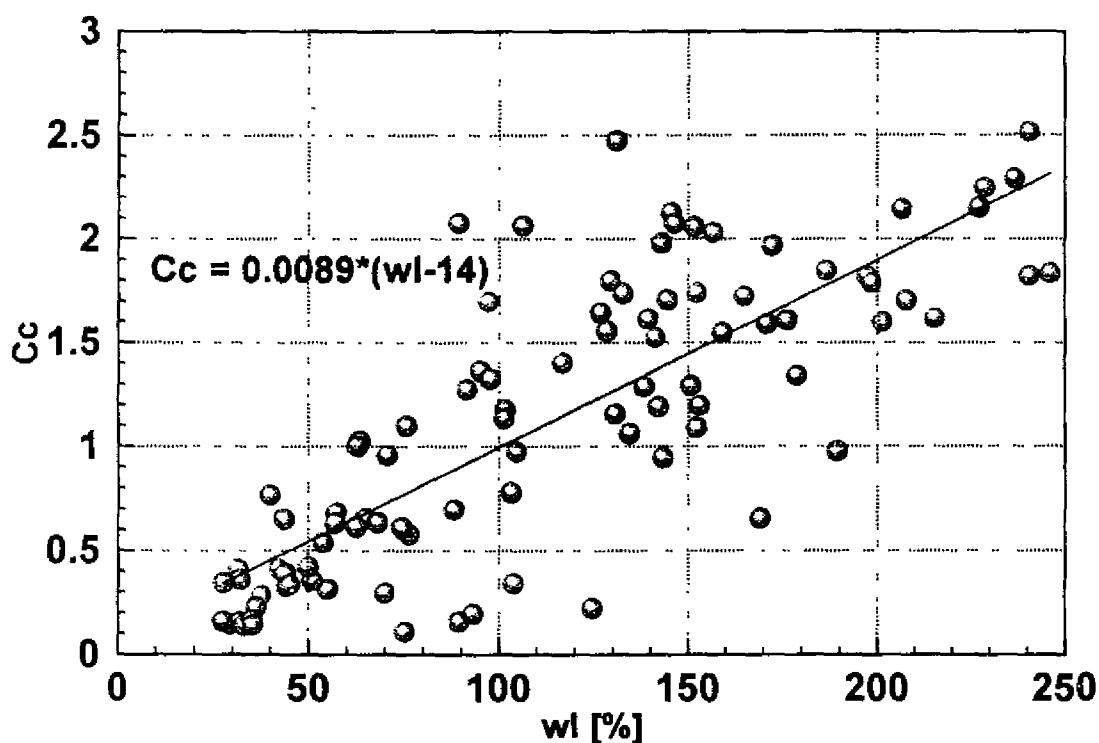


FIGURA 2.12 GRÁFICO DE ÍNDICE DE COMPRESIÓN EN FUNCIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO

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 $(e - \log \sigma')$ 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 .

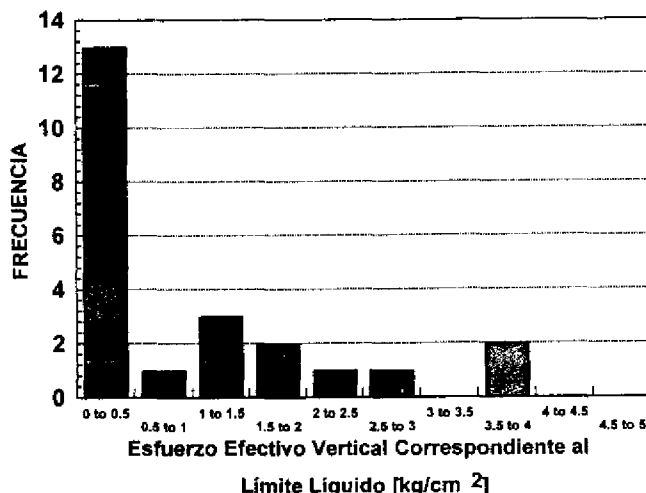


FIGURA 2.13 GRÁFICO DE HISTOGRAMA DEL ESFUERZO EFECTIVO VERTICAL CORRESPONDIENTE AL LÍMITE LÍQUIDO.

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:

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

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

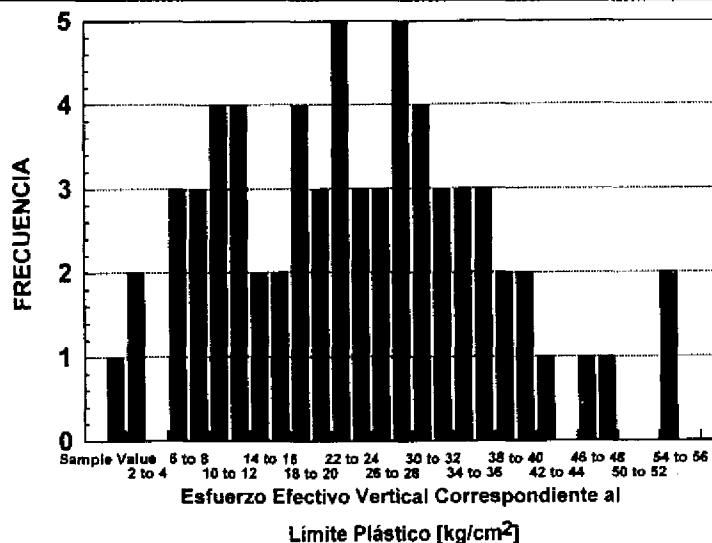


FIGURA 2.14 GRÁFICO DE HISTOGRAMA DEL ESFUERZO EFECTIVO VERTICAL CORRESPONDIENTE AL LÍMITE PLÁSTICO.

2.3.4 Resistencia al corte

La resistencia al corte de los suelos de Santafé de Bogotá se estudió principalmente con base en pruebas de compresión triaxial consolidada no drenada. Para complementar estas medidas principalmente en lo que se refiere a la resistencia al corte en esfuerzos totales se realizaron numerosas pruebas de compresión simple y de veleta de laboratorio.

Los ensayos de resistencia al corte en pruebas de compresión triaxial, se realizaron siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D 4767-88 para pruebas de compresión triaxial consolidadas no drenadas con medida de presión de poros.

La gran cantidad de pruebas realizadas constituyen una base de datos de considerable importancia para el desarrollo futuro de la ciudad. Es por ello que para su interpretación se utilizaron las teorías modernas de resistencia al corte con las cuales es posible modelar en compu-

tador el comportamiento de los suelos arcillosos

La línea de estado crítico representa la envolvente de falla en plasticidad perfecta de todas las pruebas realizadas con suelos normalmente consolidados. Esta envolvente se manifiesta en dos de los planos utilizados para interpretar los resultados: en el plano de invariantes isotrópico y desviador (p' , q') la línea de estado crítico se manifiesta como una recta que pasa por el origen (siempre y cuando no exista cementación) cuya pendiente es M . En el plano de volumen específico en función del esfuerzo isotrópico (v , p') la línea de estado crítico aparece como una curva que al ser representada en escala logarítmica se convierte en una recta paralela a la línea de compresión isotrópica.

A manera de ejemplo en la Figura 2.15 se representan los resultados obtenidos para un suelo localizado en Suba a una profundidad de 41.5 m, consolidado a 1.0, 2.5 y 5.0 kg/cm^2 .

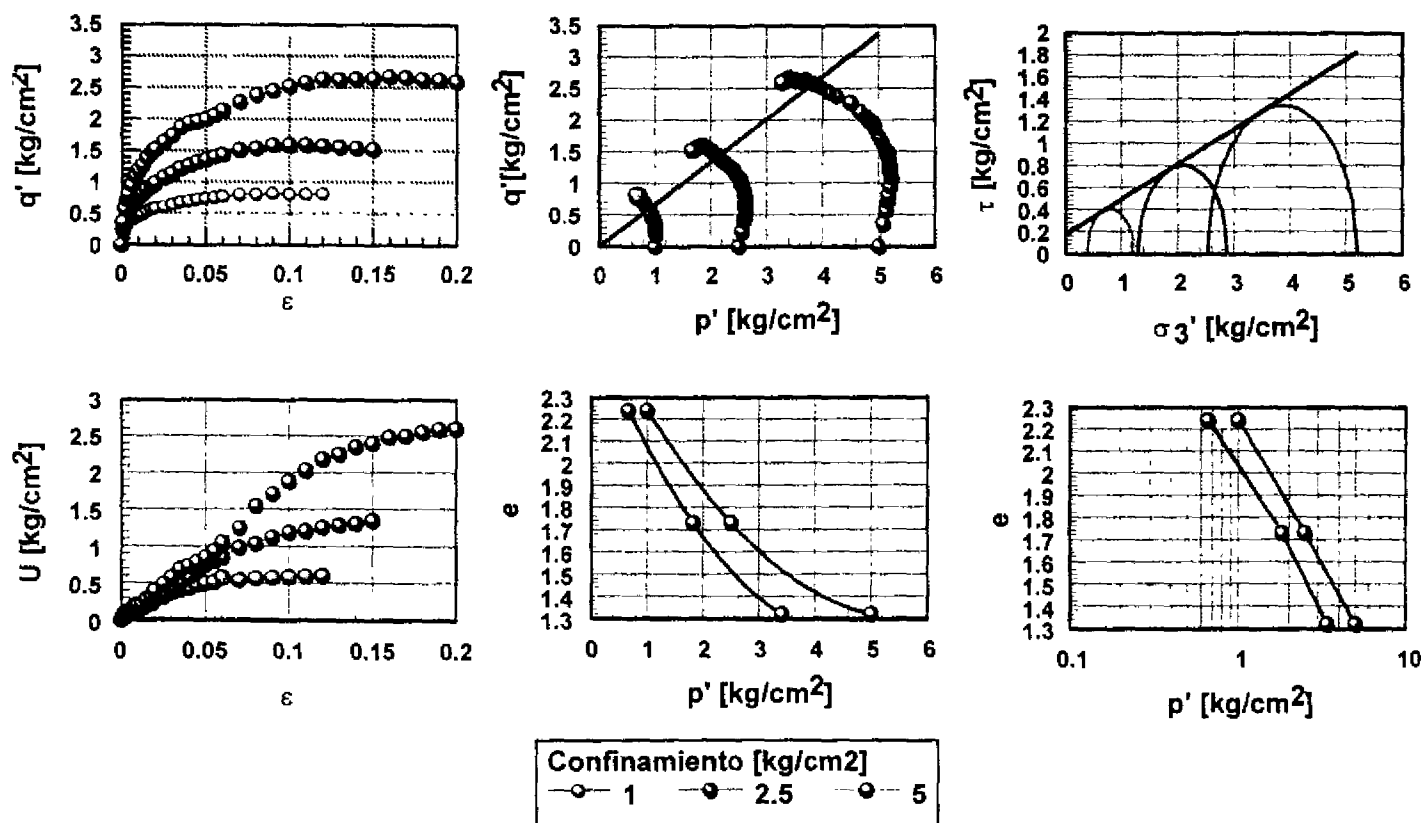


FIGURA 2.15 GRAFICO DE RESULTADO ENSAYO TRIAXIAL CU (MUESTRA N14 - 18, PROFUNDIDAD 41.5m).

2.3.5 Comportamiento del subsuelo de Santafé de Bogotá bajo cargas cíclicas

El estudio del comportamiento dinámico de los suelos de la ciudad de Santafé de Bogotá se realizó por medio de ensayos triaxiales cíclicos, ensayos con elementos piezoeléctricos para encontrar la velocidad de onda cortante en el laboratorio y ensayos in situ como el Down Hole y el Presiómetro de Menard cíclico. Debido a la gran variedad de suelos y condiciones que pueden afectar la respuesta dinámica de estos y el área de la ciudad (650 km² aproximadamente), sería económicamente imposible pensar en la posibilidad de realizar un estudio determinístico de las propiedades dinámicas de los suelos en toda la extensión de la ciudad, por lo que se decidió utilizar un modelo de comportamiento para simular el comportamiento dinámico.

En las Figuras 2.16 a 2.18 se encuentran los resultados típicos de un ensayo triaxial cíclico, los ciclos de histéresis de esfuerzo cortante τ contra deformación por corte γ_c , la curva de degradación del módulo cortante G contra la deformación por corte γ_c y la curva de amortiguamiento contra deformación por corte γ_c .

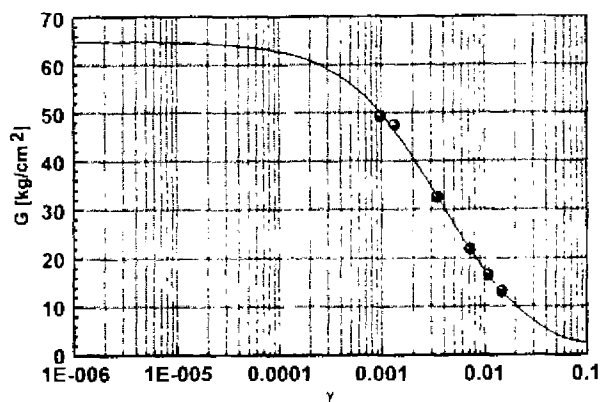


FIGURA 2.17 GRÁFICO DE RESULTADO TÍPICO DE ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO. CURVA DE MÓDULO CORTANTE EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN

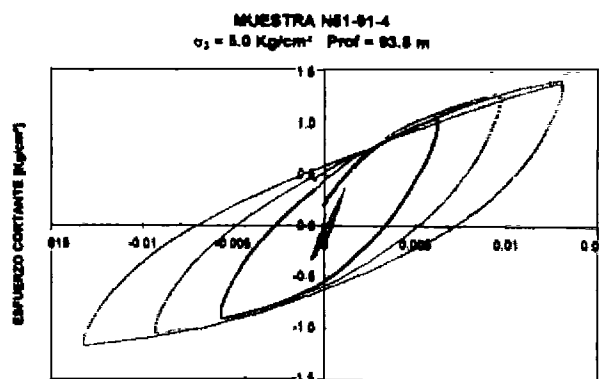


FIGURA 2.16 GRÁFICO DE LOS CICLOS DE HISTÉRESIS ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO

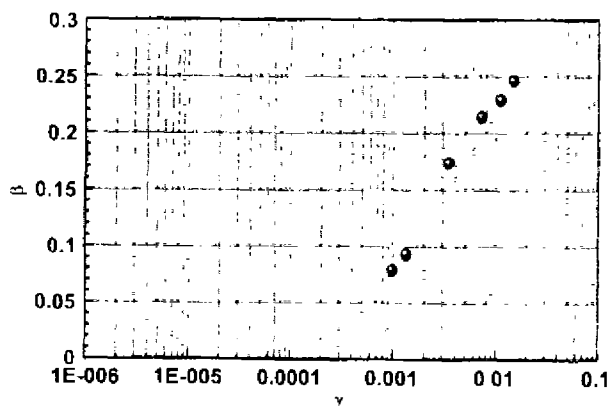


FIGURA 2.18 GRÁFICO DE RESULTADO TÍPICO DE ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO CURVA DE AMORTIGUAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN

2.3.5.1 Estudio del módulo de cortante máximo

En un equipo triaxial cíclico es difícil obtener el módulo en pequeñas deformaciones ya que éstas son difíciles de medir con la instrumentación convencional. Por este motivo para obtener el módulo máximo se recurrió a otro tipo de ensayo denominado "bender element"

desarrollado en el Instituto Geotécnico Noruego. Este ensayo está basado en la medida en laboratorio de la velocidad de una onda de cortante generada por un elemento piezoeléctrico. A manera de ejemplo en las Figuras 2.19 y 2.20 se muestran algunos resultados de estas medidas.

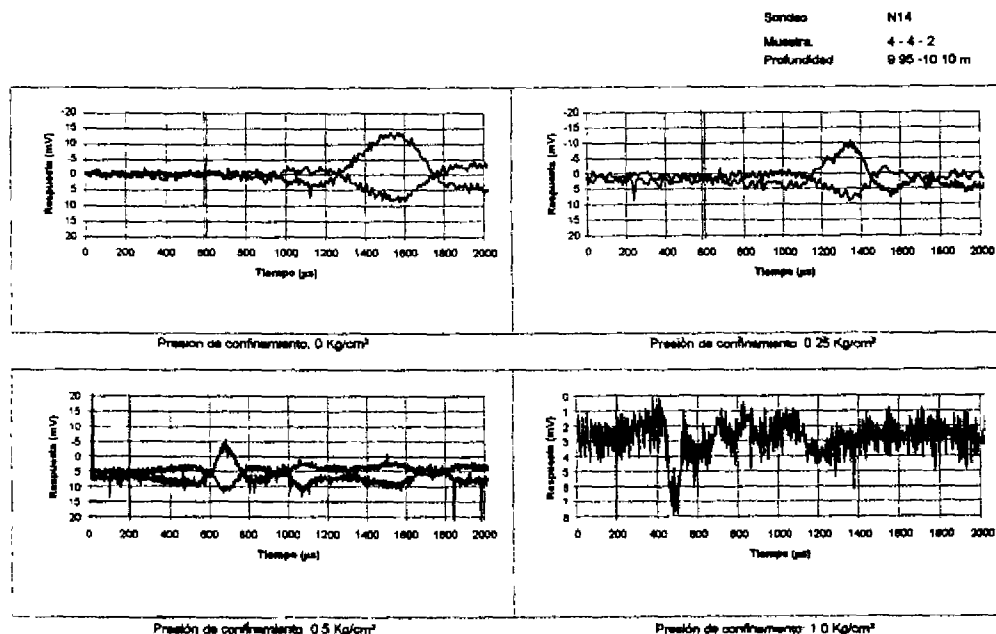


FIGURA 2.19 VELOCIDAD DE ONDA CORTANTE PARA DIFERENTES PRESIONES DE CONFINAMIENTO.

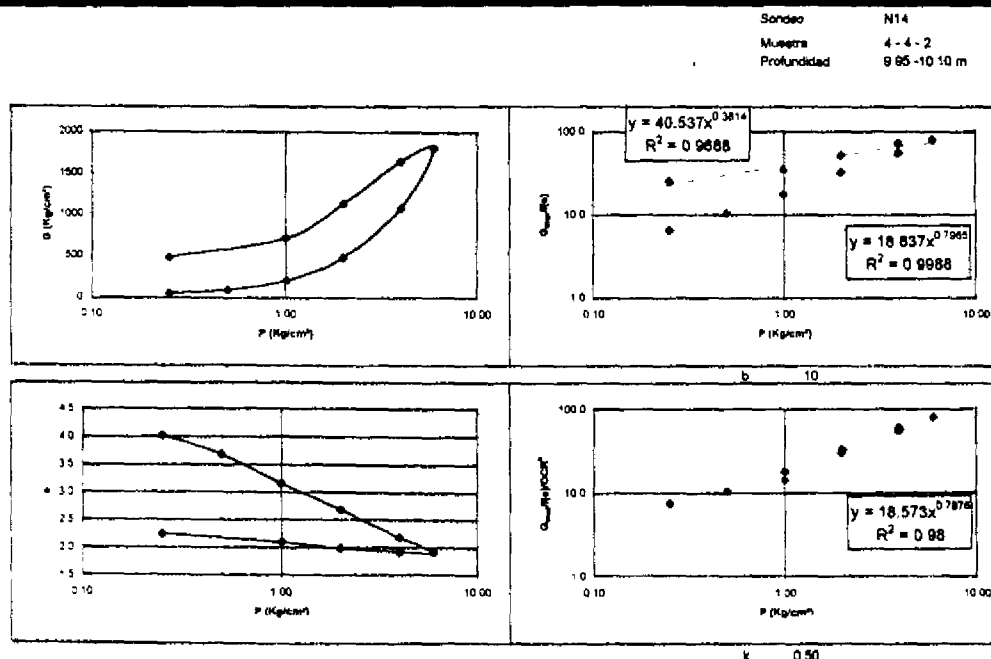


FIGURA 2.20 GRÁFICAS DEL MÓDULO DE CORTANTE MÁXIMO

Se estudiaron por separado cada una de las variables que se consideraron importantes en el comportamiento dinámico del suelo, las cuales fueron el esfuerzo de confinamiento σ_3 , la relación de vacíos e y la plasticidad (entendida como límites de Atterberg).

El módulo de cortante tangente en pequeñas deformaciones G_{max} depende fuertemente del esfuerzo de confinamiento. En las Figuras 2.21 y 2.22 se observa la tendencia que se encuentra con base en los ensayos realizados.

La influencia del índice de plasticidad está incluida en las dos variables ya estudiadas: esfuerzo de confinamiento y relación de vacíos de tal manera que para un esfuerzo de confinamiento y una relación de vacíos dados el índice de plasticidad no afecta el valor de G_{max} . Sin embargo, el índice de plasticidad sí afecta de manera importante la forma en que se degrada el módulo con la deformación.

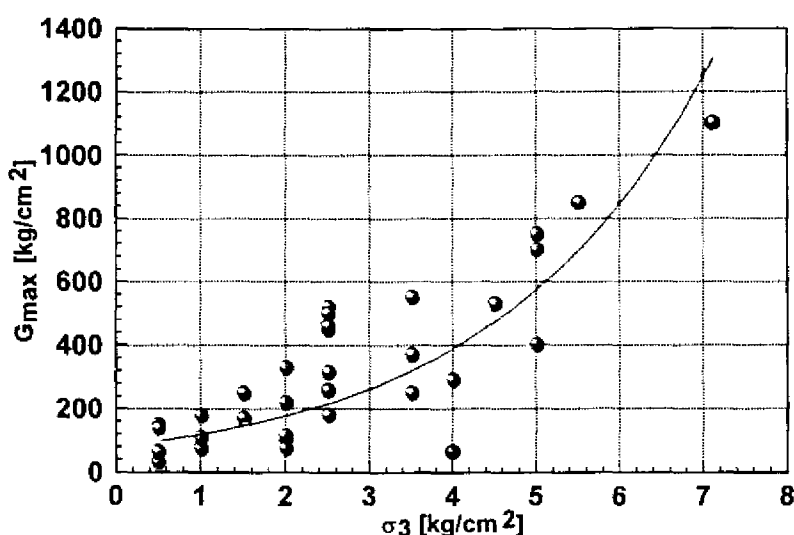


FIGURA 2.21 GRÁFICO DE G_{max} EN FUNCIÓN DEL ESFUERZO DE CONFINAMIENTO σ_3

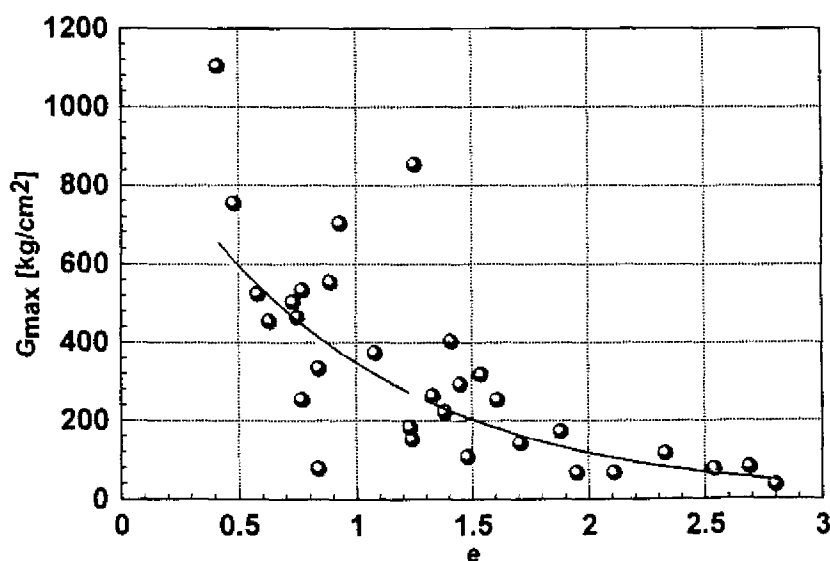


FIGURA 2.22 GRÁFICO DE G_{max} EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN DE VACÍOS e