

Propiedades geotécnicas de los suelos de Madrid

.....
 José M^a Rodríguez Ortiz

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Catedrático de Mecánica del Suelo y Cimentaciones de la U.P. de Madrid

RESUMEN

Se describe someramente el marco geológico e hidrogeológico en el que se presentan los suelos de Madrid, con una idea de su localización y posición estratigráfica. Se definen las unidades geotécnicas típicas: rellenos, aluviales, arenas de miga, arenas tosquizas, toscos y peñuelas y se asignan a cada una de ellas valores típicos de las propiedades geotécnicas usuales, tomando como base la información recogida en la Unidad de Seguimiento, Auscultación y Control de la Ampliación del metro de Madrid. Se resumen en forma gráfica los valores de plasticidad, penetración estándar, resistencia a compresión simple, cohesión y rozamiento efectivos, módulos presiométricos, etc. Se comentan otros parámetros como la permeabilidad, el K_0 , la expansividad, etc. Los valores típicos propuestos se comparan con los que aparecen en la bibliografía.

ABSTRACT

The Geological and Hydrogeological framework where the Madrid soils originate are briefly described, along with their spatial position and stratigraphy. The typical geotechnical units are defined: made fills, alluvia, Miga sand, clayey sands, "toscos" and "peñuelas" (overconsolidated clays), and characteristic values of significant geotechnical properties are given. The basis for this is the data bank compiled in the Control and Monitoring Unit of the Madrid Subway Enlargement. Data on plasticity, standard penetration test, unconfined compression, shear strength, pressiometric moduli, etc. are shown in graphs. Other parameters as permeability, K_0 value, swelling properties, etc. are also discussed. The proposed values are compared with other appearing in technical literature.

1. INTRODUCCIÓN

La Ampliación del Metro de Madrid, a partir de 1996, supuso la realización de un amplio número de sondeos, los cuales se fueron completando con nuevas prospecciones en el curso de las obras, tanto para aclarar condiciones geotécnicas puntuales como para analizar riesgos de subsidencia, definir tratamientos del terreno, investigar zonas problemáticas, etc.

La citada información se ha ido recopilando, en soporte informático, en la denominada Unidad de Seguimiento, Auscultación y Control. A partir de 1998 la Dirección General de Infraestructuras de la Comunidad de Madrid consideró que podía

ser muy útil poner los datos recogidos a disposición de los ingenieros geotécnicos por lo que se inició la creación de un Banco de Datos, con el objetivo final de elaborar una cartografía geotécnica de Madrid que recogiera todos los datos disponibles de tipo estratigráfico, hidrogeológico y geotécnico.

Dado que la información de la Ampliación de Metro se circunscribía a una serie de líneas, en gran parte periféricas, la cobertura del territorio madrileño distaba mucho de ser suficiente, por lo que se decidió incorporar a la Base de Datos la máxima información posible obtenible de las empresas geotécnicas que habían realizado sondeos y estudios en Madrid en las últimas décadas.

La recopilación no se extendió mas allá de los años 70 ya que se habían destruido muchos archivos y, por otra parte, de la calidad de las descripciones e identificaciones de los suelos, la localización de los mismos, etc. dejaba mucho que desear.

Más que la definición estratigráfica, relativamente sencilla de establecer con prospecciones convencionales, se buscó una precisa definición de parámetros, sobre todo los que inciden sobre la capacidad portante, deformaciones, subsidencia, empujes, etc. Esto ha permitido definir valores que podrían denominarse *característicos*, desde un punto de vista geoestático.

Se incluye la base cartográfica general, así como los datos geotécnicos que mejor ilustran la caracterización de propiedades de los suelos de Madrid. No obstante hay que tener en cuenta que la Base de Datos se está ampliando continuamente por lo que los valores de los parámetros pueden sufrir ligeras modificaciones en el futuro.

2. ANTECEDENTES

Aunque la Geología de Madrid ha sido objeto de diversos estudios, desde la *Descripción física y geológica de la provincia de Madrid*, de Casiano de Prado (1848), las propiedades geotécnicas de los suelos madrileños no empezaron a recibir atención hasta el gran desarrollo de la ciudad en los años 60-70 proporcionó una amplísima información de sondeos y excavaciones, lo cual cristalizó en diversos ensayos de síntesis entre los que destacan las publicaciones monográficas de V. Escario (1.970 y 1985), *El Estudio del subsuelo de Madrid* elaborado por el Ayuntamiento de Madrid entre 1968 y 1971, con el apoyo de diversos organismos, así como diversos artículos de A. García Yagüe, C. Oteo, P. de la Fuente, J.M^e Rodríguez Ortiz, etc.

3. LOS SUELOS DE MADRID Y SU DISTRIBUCIÓN

Como es sabido en la ciudad de Madrid se encuentran, en dirección NO-SE formaciones detríticas de naturaleza arenosa en los niveles superiores y mas arcillosas o tosquizas en los inferiores (Facies Madrid), los cuales van pasando progresivamente a las formaciones arcillosas activas, denominadas típicamente peñuelas, para terminar en las facies evaporíticas (yesos) (Facies Central).

En la denominada Facies Madrid son frecuentes las intercalaciones arcillosas o tosquizas en los tramos arenosos, mientras que en los niveles arcillosos abundan los paleocanales de carácter eminentemente arenoso. Por los datos de que se dispone en la actualidad, cabe definir, en primera aproximación, la cota 670 m.s.n.m. como nivel diferencial entre la arena y el tosco en la zona Norte de la ciudad. Por el contrario, en la vaguada del río Manzanares debe considerarse

la cota 630 como límite. El máximo espesor de esta unidad en el ámbito de Madrid alcanza los 110 m, si bien experimenta una notable reducción hasta decenas de metros hacia el Sur, debido a las relaciones de cambio lateral de facies con las unidades arcillosas.

En los suelos tosquizos se advierten cementaciones debidas, por un lado, a la carga litostática que supuso la columna original de sedimentos y, por otro, a procesos diagenéticos a causa, probablemente, de la presencia de microcristales de feldespatos y cuarzo.

En la denominada Facies Central, con una sedimentación de carácter eminentemente químico, se distinguen tres tramos netamente diferenciados: inferior yesífero, intermedio arcilloso y superior calcáreo.

Los afloramientos del tramo yesífero ocupan el sector más meridional del término, destacando el gran escarpe visible en la margen izquierda del Manzanares. Constituye una gran formación yesífera, que alcanza una potencia total superior a los 110 m por debajo de la cota 560. Estos materiales se presenta en forma masiva hacia su base, alternando gruesas capas de yeso cristalino y cristalizado, en la vertical se aprecia una progresiva evolución hacia alternancias de arcillas de tonos pardo-grises o verdosos y bancos yesíferos con espesores variables desde la escala centimétrica hasta 2 ó 3 metros. Localmente se aprecian intercalaciones de bancos tableados muy finos de dolomías o magnesitas. Esta unidad constituye la representación, en el término de Madrid, de la gran Unidad Salina que ocupa el dominio central de la Cuenca de Madrid.

Los niveles inferiores de esta formación acusan un neto empobrecimiento en términos evaporíticos hacia el Norte, es decir: distalmente al centro de la cuenca, aumentando la componente detrítica, de manera que pasa a margas gris-verdosas entre las que progresivamente van intercalándose capas cada vez más potentes de arcillas pardo-rojizas. Los yesos quedan confinados en las niveles más altos del tramo.

La sedimentación de estos materiales tuvo lugar en un medio lacustre, bajo unas condiciones climáticas de extrema aridez.

El Tramo Intermedio se localiza en ambas márgenes del Manzanares, hacia el Sur de los distritos de Arganzuela y Mediodía, así como también en ambas vertientes del Manzanares, hacia Entrevías y Mercamadrid, por el Este, y Orcasitas y Villaverde, por el Oeste. Corresponde a una suerte de transición lateral hacia el Norte desde las facies evaporíticas de la unidad anterior. Este tránsito se va materializando en un cambio progresivo desde los yesos tableados y nodulares con arcillas, hacia niveles predominantemente arcillosos. El espesor de esta unidad supera los 26 m, este tramo alcanza aproximadamente hasta la cota 620.

Lateralmente y hacia el Norte, estas arcillas van perdiendo su carácter predominantemente yesífero y van adquiriendo un carácter más arcilloso y masivo, con coloraciones verdosas. La sedimentación de estos materiales participa de ambientes lacustres y palustres, en condiciones climáticas evaporíticas.

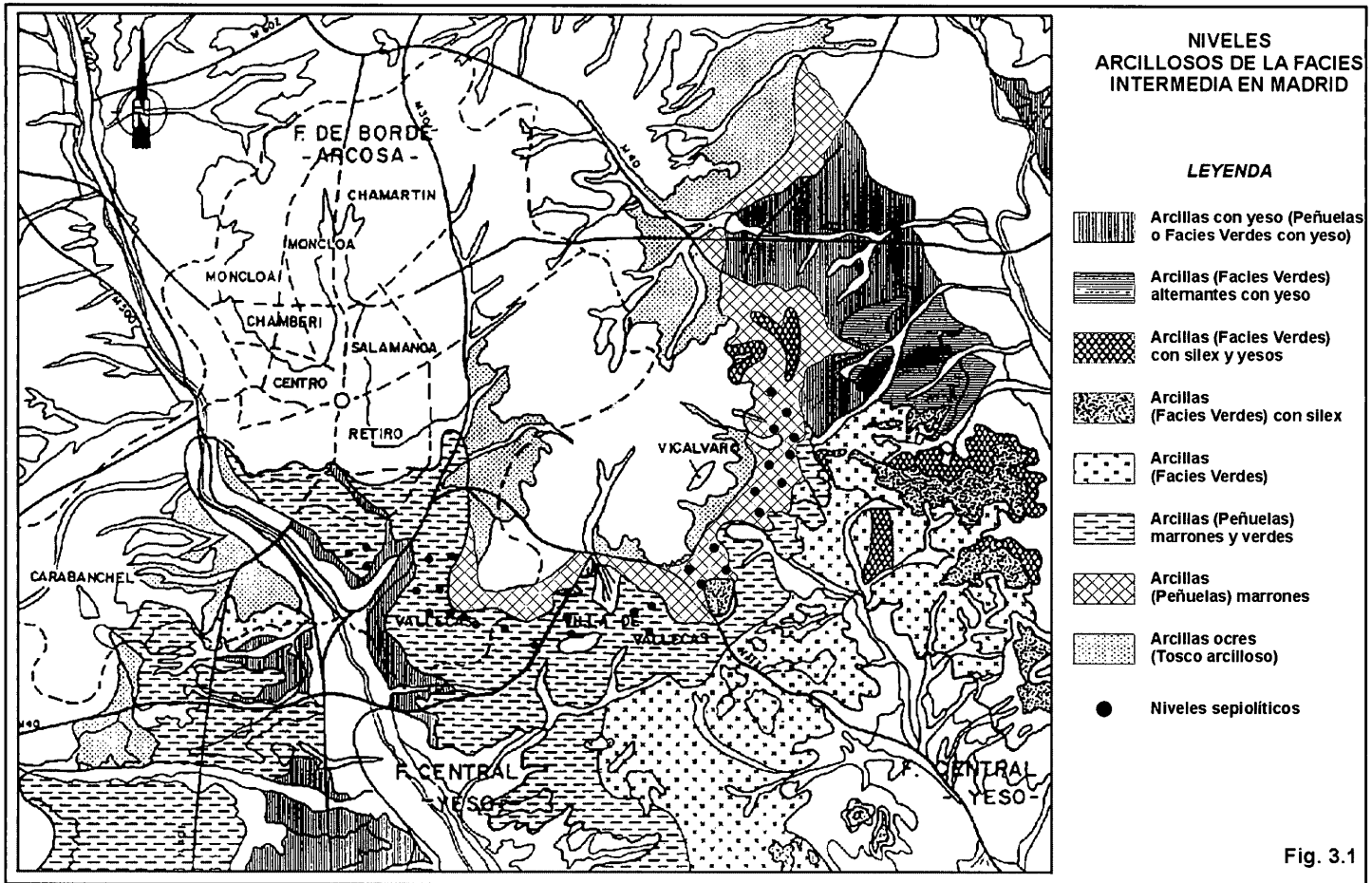


Fig. 3.1

Figura 3.1.

La figura 3.1, elaborada por C. Prieto, muestra la distribución en planta de los materiales arcillosos del S-SE de Madrid.

El Tramo Superior está constituido por calizas lacustres griseas a color crema, compactas, bien estratificadas, con abundantes moldes de yeso, pudiendo pasar en la vertical a carbonatos masivos dolomíticos y arcillas verdosas, que con frecuencia aparecen interestratificadas en los paquetes carbonáticos. Sus afloramientos se restringen a la parte más meridional del término, al sureste de Vallecas; Oteo y Moya (1978) reflejan su aparición, en forma de materiales dolomíticos, en el perfil geológico de la línea IX del Metro de Madrid. Su límite inferior corresponde con una superficie de paleokarstificación, sobre los yesos infrayacentes.

Bajo esta unidad aparecen arenas arcósicas finas y calca-renitas, cuya potencia es discontinua y es raro que supere los 20 m en total. Bajo estas arenas y a techo de los materiales del tramo intermedio, se dispone un conjunto de capas de calizas cristalizas de tonos marrón o blanquecinas y margosas, margas grises o verdosas duras y muy arcillosas, yesos masivos sacaroideos y nódulos o placas de sílex. La distribución del conjunto es completamente errática.

Estos tres conjuntos sedimentarios presentan una manifiesta relación de continuidad estratigráfica, tanto en la vertical como en la horizontal, por lo que los tránsitos relativos se matizan de forma muy gradual. En líneas generales, las arcillas con yesos tableados se disponen sobre los yesos masivos, que constituyen grandes afloramientos en el margen Sur del casco urbano.

La denominada Facies de Transición constituye el tránsito lateral entre la litofacies de borde, denominada "Facies Madrid" y la Facies Central. Como ya se ha indicado, dentro de la "Facies Central" se aprecia un progresivo empobrecimiento de términos yesíferos hacia el Norte. En la zona sur del casco urbano estas arcillas presentan tonos rojizo-anaranjados y verde-grisáceos, quedando los yesos relegados a muy escasos bancos de espesor decimétrico, la estructura es masiva. Lateralmente y hacia el Norte, el carácter se hace más masivo, tornándose la coloración hacia matices decididamente más verdosos, siendo frecuente la presencia de intercalaciones de carbonatos blanquecinos, parcialmente silicificados, en ocasiones incluyen lechos de arena fina muy ricos en micas negras, de espesor decimétrico.

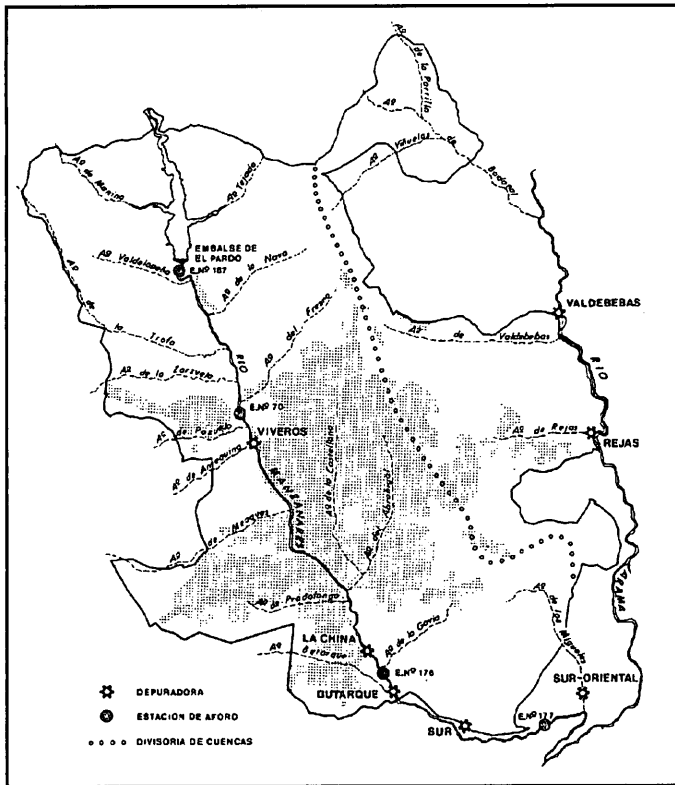


Figura 3.2. Esquema de la red hidrográfica superficial. (Ayuntamiento de Madrid, 1986)

Dentro de esta facies, los materiales presentan unas coloraciones verdes y rosadas, con intercalaciones de arenas micáceas verdosas y margas, así como también algunos niveles de carbonatos y sílex.

La extensión de afloramientos de esta unidad es amplia, abarcando todo la franja centro-meridional y oriental del término municipal, prolongándose desde Carabanchel a Villaverde, Orcasitas, Vallecas y Vicalvaro, avanzando hacia el Norte, hasta la Plaza Elíptica y barrios de la Arganzuela y Mediodía. El afloramiento más septentrional de esta unidad se localiza en el cementerio de San Isidro y zona del Puente de Toledo, donde las arcillas verdes se encuentran entremezcladas con arcillas de tonos marrones que prologan el tránsito gradual con los materiales arcillosos adscritos a la Facies Madrid.

El límite inferior de esta unidad se define por una yacencia directa sobre los niveles yesíferos de la facies central, siendo frecuente la presencia de niveles carbonatados. Estos niveles basales suelen aparecer deformados fundamentalmente de forma plástica, adaptándose a depresiones de origen exokárstico sobre los yesos, posteriormente reactivadas.

Estos materiales se encuentran ampliamente descritos en la literatura geológico-geotécnica, donde se establece la terminología tradicional con que suelen denominarse los diferentes términos litológicos que integran la facies. Así, se ha aplicado el término “peñuela” a las arcillas y margas verdosas de esta unidad, si bien su alcance suele incluir los términos lutíticos de

la facies central, dado el carácter análogo que presentan todos estos materiales en conjunto, motivado por la convergencia de las diferentes litofacies en cuanto a génesis. El término “cayuela” alude a los niveles calco-margosos y calcareos, coherentes, de tonos blanquecinos que aparecen inmersos en las “peñuelas” y suelen estar asociados con niveles de sepiolita, en virtud del proceso genético de estos silicatos fibrosos.

El Cuaternario está representado por los depósitos aluviales adscritos a los cauces fluviales que drenan el territorio (ver fig. 3.2) y en menor medida, por formaciones de escaso espesor asociadas a las superficies de erosión y los glaciares. Los depósitos correspondientes a conos aluviales, coluviones, derrames, limos yesíferos y otros sedimentos relacionados con las depresiones endorreicas o de origen kárstico (por disolución del sustrato yesífero) son formaciones puntuales de escasa importancia y extensión reducida.

Los materiales asociados a las superficies de erosión suelen ser arcosas de tamaño grueso con cantos y bloques de granito y cuarzo, cuyo espesor raramente supera los 4 m, siendo en ocasiones difícil la diferenciación con los términos arenosos de la Facies Madrid.

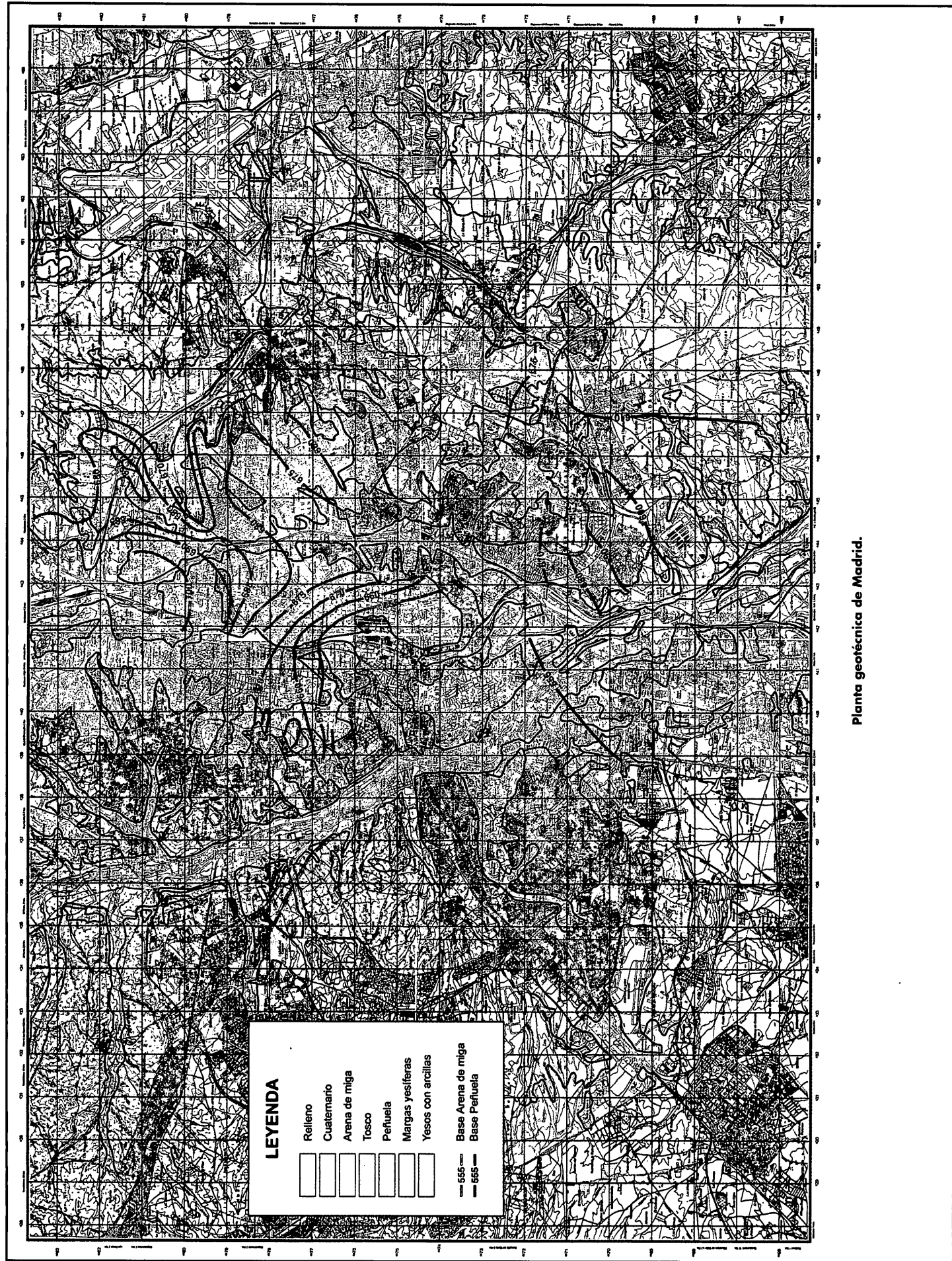
Respecto a los glaciares están formados por materiales fundamentalmente arenosos, cuya composición litológica y textural depende del sector donde se han desarrollado, de manera que en la zona norte están constituidos por materiales arenosos con cantos de granitoides y cuarzo, mientras que en la zona suroriental los depósitos son arenoso-arcillosos, con cantos de caliza, sepiolita y sílex.

En la ciudad, los afloramientos de esta unidad articulan el declive desde las superficies anteriormente indicadas y se extienden por ambos márgenes del eje de la Castellana, hasta alcanzar la Plaza de España y barrios de la Latina y Mediodía al Oeste, mientras que hacia el Este alcanza el distrito de Retiro. Otros afloramientos se emplazan en declive desde los altos de Carabanchel y Villaverde.

Dentro de los depósitos cuaternarios hay que contar igualmente con las terrazas de los ríos Manzanares y Jarama, junto a algunos niveles de mucho menor importancia adscritos a las dinámicas de los principales arroyos, tributarios de ambos cauces principales.

Por último merecen una mención especial los rellenos antrópicos. Son muy abundantes en el área urbana y reflejan las sucesivas actuaciones urbanísticas de suavización del relieve, creación de viario, fases sucesivas de construcción y demolición, etc. Se encuentran potencias importantes de escombros, vertederos de basuras, etc. También existen abundantes franjas de antiguas trincheras rellenas, zanjas de servicios, obras del Metro, etc. La distribución de los rellenos es muy errática y su localización exige prospecciones detalladas.

Se conocen diversas cartografías que definen la disposición en planta de las formaciones típicas de Madrid, siendo quizá el más completo el correspondiente al MAGNA, a escala 1:50.000. Se adjunta un mapa geotécnico elaborado con la in-



LEYENDA

- Repleno
- Cuaternario
- Arena de miga
- Tosco
- Peñuela
- Margas yesíferas
- Yesos con arcillas
- Base Arena de miga
- Base Peñuela

Planta geotécnica de Madrid.

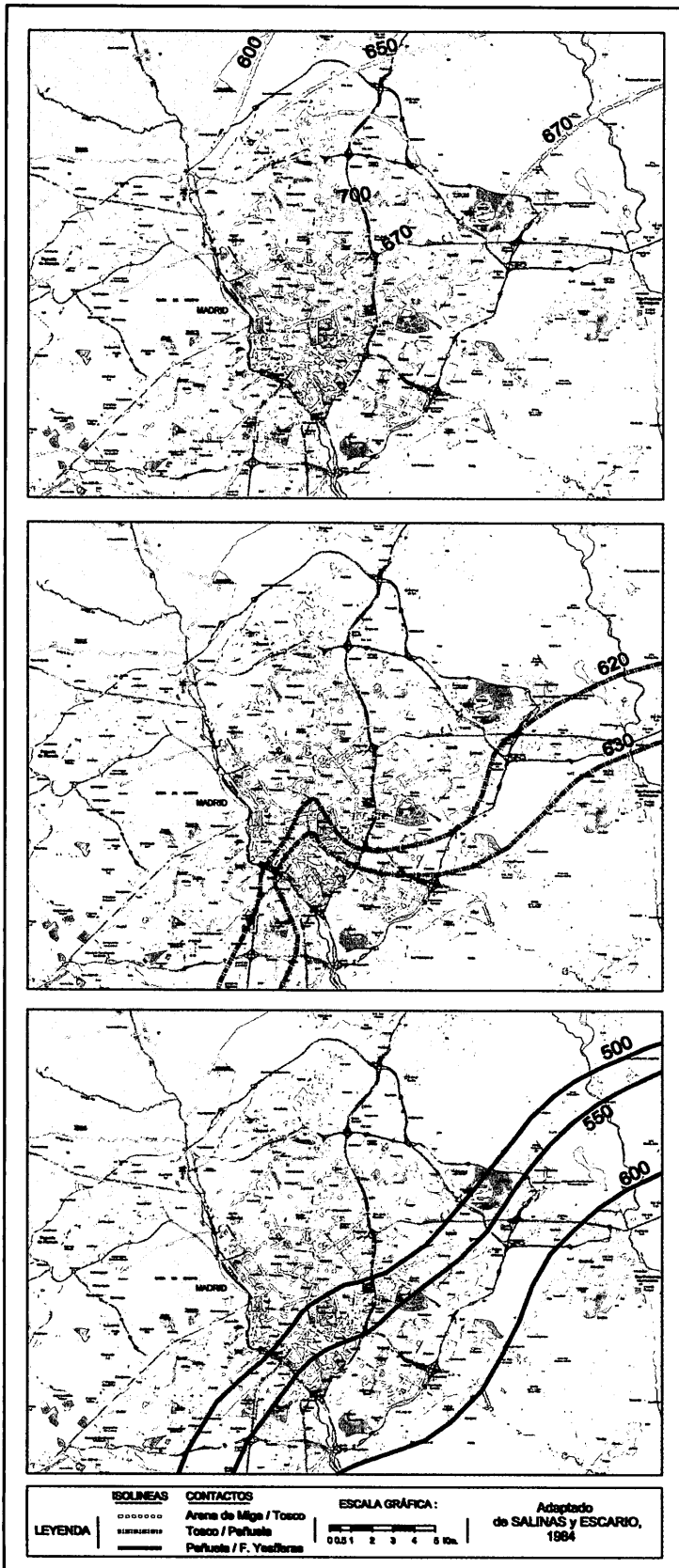


Figura 3.3. Contactos entre unidades geotécnicas.

formación preexistente y la correspondiente a la Ampliación del Metro. Es interesante comparar las isolíneas de este mapa con las definidas por Salinas y Escario (1984) (fig. 3.3).

Existe también una colección de perfiles estratigráficos correspondientes a las diversas líneas de Metro últimamente realizadas, los cuales se publicarán próximamente.

Resulta imposible establecer una única columna estratigráfica típica del terreno de Madrid, con moderada variación de cotas, ya que existen oscilaciones significativas en distancias cortas.

4. UNIDADES GEOTÉCNICAS Y SUS PROPIEDADES

Existe una práctica establecida que consiste en denominar a los diferentes materiales según una terminología tradicional que incluye los términos siguientes : arenas de miga, toscos, peñuelas y sus combinaciones. Esta terminología es frecuentemente denostada bajo una perspectiva estrictamente geológica, por cuanto agrupa formaciones con significado litoestratigráfico diferente, sobre todo desde el punto de vista cronoestratigráfico. Sin embargo en la presente descripción de unidades geotécnicas se mantiene la terminología tradicional por razones prácticas.

Las denominaciones habituales suelen ajustarse a la siguiente clasificación:

Denominación	% de finos (< 0,08 mm)
Arena de miga	< 25
Arena tosquiza	25 - 40
Tosco arenoso	40 - 60
Tosco	> 60

Desde una perspectiva estrictamente geotécnica, los suelos de Madrid presentan una serie de peculiaridades entre las que destaca la enorme variabilidad de aparición, con un difícil seguimiento de niveles tanto en horizontal como en vertical, los frecuentes cambios laterales en litología y espesor, la existencia de deformaciones carentes de motivación tectónica, etc. Salvo los niveles mas superficiales su comportamiento tenso-deformacional es excelente, destacando la elevada resistencia que presentan, sobre todo los niveles más arcillosos, comúnmente denominados "tosquicos" o las típicas "peñuelas", con un elevado grado de preconsolidación. No obstante determinados niveles arcillosos, de alta plasticidad, presentan la característica desfavorable de la expansividad, la cual ha creado abundantes problemas en edificios del sur de Madrid.

En los párrafos que siguen se dan valores de distintas propiedades de los suelos, tal como se han deducido de los numerosos ensayos realizados para la Ampliación del Metro de Madrid o recopilados a partir de informes geotécnicos de empresas especializadas. Aunque se ha realizado una prolija depuración de los datos no puede descartarse la inclusión de va-

lores erróneos o con defectos de asignación, ya que no siempre las descripciones de los suelos se corresponden con los criterios generales de clasificación, ni puede garantizarse la calidad de todos los ensayos, en especial los referentes a la resistencia al corte, presiometría, etc. ya que son conocidas las dificultades inherentes a dichos ensayos.

Las Unidades Geotécnicas que habitualmente se distinguen en el término municipal de Madrid son las siguientes:

3.1. Rellenos antrópicos

Esta unidad está constituida por materiales de aportación artificial, fundamentalmente como consecuencia de actividades constructivas (vertederos de tierras y escombros, terraplenes controlados, etc.) y, en mucho menor manera, como resultado de la actividad industrial (vertederos de residuos sólidos industriales y escorias) y biológica-urbana (vertederos de residuos sólidos urbanos).

La naturaleza de este tipo de materiales es muy heterogénea, pudiendo variar desde escombros y basuras hasta suelos de áreas próximas, difícilmente distinguibles del propio substrato litológico, cuyo único contraste puede atender a un diferente estado de compactación, en el caso de que se trate de simple vertido, lo cual tiene la ventaja de una fácil identificación mediante ensayos de penetración dinámica. Puede decirse que terrenos con $N_{SPT} < 20$, corresponden a rellenos. Hay que indicar que la antigüedad mejora muy poco la compactación de estos rellenos, encontrándose igualmente flojos los de hace dos siglos que los de hace 30 años. Las mayores diferencias se encuentran entre los recién vertidos y los de hace más de 2-3 años.

Al igual que en todos los núcleos urbanos importantes, estos materiales suelen localizarse en las antiguas vaguadas y en los sucesivos márgenes del casco urbano en la progresiva evolución de la ciudad. Son conocidos los grandes volúmenes de rellenos creados por el conde de Floridablanca para facilitar la salida hacia el Sur, salvando los escarpes del Manzanares; las remodelaciones asociadas a la construcción de la Ciudad Universitaria; las trincheras de la Guerra Civil, etc.

Según las síntesis efectuadas por el Ayuntamiento de Madrid, el volumen de rellenos se evalúa en torno a los 350 millones de metros cúbicos, ocupando una extensión de 67,5 km², lo que representa el 11% de la superficie del Municipio.

Las características geotécnicas de esta unidad resultan difícilmente resumibles, dada la fuerte heterogeneidad que estos materiales suelen presentar en cuanto a origen, compactación, etc., destacando dos rasgos generalmente singulares para esta unidad: en primer lugar y fundamentalmente, una deformabilidad extremadamente alta (en general superior al 3% del espesor), debido a la baja compactación y frecuente presencia de arcillas con elevados contenidos en humedad, y en segundo lugar, la posibilidad de que se alcancen altos niveles de agresividad al hormigón convencional, como consecuencia de la

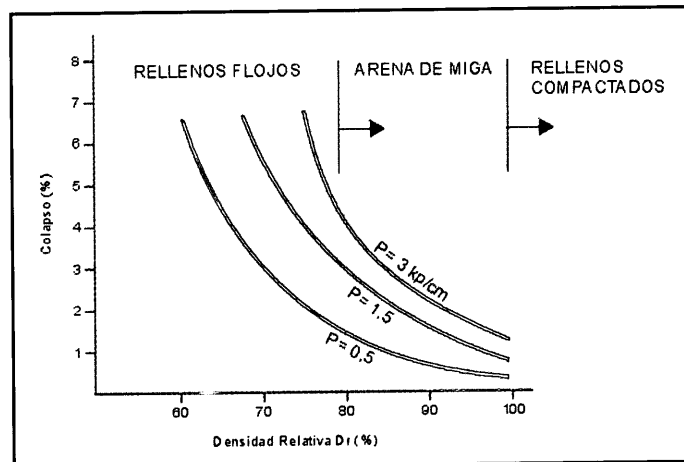


Figura 4.1. Colapso de materiales granulares en el área de Madrid.

presencia de elementos químicos diversos, procedentes de vertidos de residuos industriales. También hay que indicar la elevada permeabilidad, lo cual genera niveles freáticos anormales, no concordantes con los de las formaciones encajantes y, por otro lado, la elevada colapsabilidad al saturarse.

En los rellenos simplemente vertidos los asentamientos de colapso pueden llegar al 10% del espesor. Lógicamente la colapsabilidad disminuye con la compactación pero incluso rellenos arenosos compactados al 100% del Proctor Normal son susceptibles de asentamientos en la gama 0,3-0,6% (López Corral, 1978). En la fig. 4.1 se muestra una estimación del porcentaje de colapso para distintas densidades relativas de rellenos procedentes de arenas de miga, y distintas presiones verticales de confinamiento p .

En unos casos los rellenos son de la misma naturaleza que los terrenos próximos, pero mucho más flojos, lo cual da lugar a frecuentes errores de interpretación; en otros casos se trata de escombros de demolición, mucho más heterogéneos. Los más peligrosos son los basureros o vertederos con abundante materia orgánica y materiales degradables.

La extrema deformabilidad de estos materiales ($N_{SPT} < 15$) restringe su capacidad portante, lo cual les invalida como nivel de cimentación, siendo frecuente la aparición de patologías constructivas ligadas a defectos en la cimentación, en edificios construidos sobre estos materiales, destacando también las fuertes afecciones a la estabilidad de las infraestructuras lineales, como sucedió en la Avenida de la Ilustración, que se construyó sobre los echadizos que colmataban la antigua vaguada del barrio del Pilar.

Desde un punto de vista práctico es frecuente asignar a los rellenos de origen natural parámetros del orden siguiente:

Peso específico aparente	1,80 t/m ³
Cohesión efectiva	Nula
Angulo de rozamiento efectivo	22° (naturaleza arcillosa) 28° (naturaleza arenosa)
Módulo de deformación	80-100 kp/cm ²

TABLA 1. ALUVIALES

PROPIEDADES	MÁXIMO	MÍNIMO	MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA	Nº DE MUESTRAS
HUMEDAD %	28	3,1	16,4	6,28	59
DENSIDAD NATURAL (g/cm ³)	2,19	1,61	2,0	0,15	35
DENSIDAD SECA (g/cm ³)	1,98	1,44	1,7	0,11	41
PASO POR EL T. UNE 0.08 =T. ASTM N° 200 (%)	98,62	0,7	33,7	34,00	131
LÍMITE LÍQUIDO	71,1	21	38,0	40,00	65
LÍMITE PLÁSTICO	41,1	13,5	19,0	20,00	63
INDICE DE PLASTICIDAD	38	4,5	19,5	15,00	63
ÁNGULO DE ROZAMIENTO	34,39	20,9	26,8	6,92	3
COHESIÓN EFECTIVA (kPa)	39	0	13,1	22,65	3

Estos valores se utilizan principalmente a efectos de cálculo de empujes sobre muros o pantallas pero erróneo emplearlos para el proyecto de cimentaciones ya que, en este caso, prevalecen los efectos de asentamiento propio de los rellenos, colapso, etc.

En el caso de escombros de demolición el rozamiento interno es elevado (34°-45°), pero la compresibilidad y degradación son muy altas. Los basureros muestran unas propiedades muy variables, en función de su composición y el mayor o menor contenido en materia orgánica. Poseen una cierta "trabazón" en lugar de cohesión y un rozamiento interno entre 14° y 32°. El módulo de deformación puede ser tan bajo como 20 kp/cm², siendo lo más grave las deformaciones diferidas, a lo largo de muchos años, según se va produciendo la degradación de la materia orgánica.

4.2. Depósitos cuaternarios

Como se ha indicado en las descripciones geomorfológicas y litoestratigráficas, los depósitos cuaternarios alcanzan un amplio desarrollo en el término municipal de Madrid, destacando fundamentalmente los sedimentos ligados a la dinámica aluvial, asociados a los arroyos y principales cauces fluviales.

En líneas generales, los depósitos cuaternarios suelen estar constituidos por materiales arenosos o limosos, con mayor presencia de gravas en las terrazas de los ríos Jarama y Manzanares, algunas de las cuales suelen aparecer cementadas, sobre todo en la vertiente del primero, siendo también frecuente la aparición de niveles fangosos intercalados, ligados a una fuerte presencia de materia orgánica. Con todo, se trata de materiales con características geotécnicas muy variables y cuyo seguimiento resulta complejo en ocasiones, dada la similitud de caracteres que en ocasiones muestran con respecto al substrato, sobre todo cuando este corresponde a las arenas de miga y los toscos.

La representación más importante corresponde a los depósitos aluviales de vaguada, los cuales presentan una gran variabilidad como puede deducirse de los valores de la tabla 1.

La resistencia a la penetración dinámica es baja, con valores $5 < N_{SPT} < 30$. En correspondencia, los módulos de deformación suelen estar comprendidos entre 60 y 200 kp/cm².

4.3. Arenas de miga

Esta unidad constituye un conjunto en el que se incluyen las Arcosas Superiores del Aragoniense superior, por tanto suponen la representación de la facies Madrid en la Unidad Tecosedimentaria Superior, junto a las arenas cuarzo-feldespáticas asociadas a las superficies de arrasamiento pertenecientes al Plio-Cuaternario. Ocupa la mayor parte del casco urbano antiguo y corresponde a la segunda unidad más importante en cuanto a extensión, lo que representa un 29,8% del término.

Se trata de una unidad constituida predominantemente por masas arenosas de naturaleza cuarzo-feldespática o arcósica, apareciendo intercalaciones e indentaciones de conjuntos arcillosos compactos, de índole diversa, aunque con predominancia de los filosilicatos micáceos, procedentes de la alteración de los feldespatos por procesos de hidrólisis.

Las características texturales de estos materiales pueden considerarse homogéneas, en general, siendo frecuente la alternancia de tramos de granulometría más gruesa con otros más arcillosos e incluso calcáreos, aunque siempre muy subordinados, lo cual favorece la aparición de acuíferos colgados de extensión muy limitada emplazados al abrigo que suponen los niveles arcillosos como substratos impermeables. Estas características granulométricas les confieren una elevada permeabilidad, lo cual facilita la formación de encostramientos y exudaciones calcáreas por la removilización de las sales disueltas.

En general, se trata de un conjunto fundamentalmente arenoso y, en menor manera, areno-arcilloso con plasticidad fundamentalmente baja y compacidad alta, exceptuando los horizontes más superficiales que suelen encontrarse afectados por meteorización y decompresión por alivio tensional motivado por la erosión de parte del registro sedimentario que se localizaba suprayacente.

TABLA 2. ARENA DE MIGA

PROPIEDADES	MÁXIMO	MÍNIMO	MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA	Nº DE MUESTRAS
HUMEDAD %	43,4	4,33	12,8	5,24	145
DENSIDAD NATURAL (g/cm ³)	2,3	1,67	2,1	0,13	54
DENSIDAD SECA (g/cm ³)	2,12	1,15	1,9	0,14	80
PASO POR EL T. UNE 0.08 =T. ASTM N° 200 (%)	50,4	2,6	17,9	6,77	569
LÍMITE LÍQUIDO	65,5	18,51	31,6	5,48	182
LÍMITE PLÁSTICO	35,2	11,8	17,7	2,76	177
INDICE DE PLASTICIDAD	30	1,83	13,8	5,28	177
MÓDULO PRESIOMÉTRICO (Kp/cm ²)	1800	200	760	-	76
PERMEABILIDAD OBTENIDA CON EL ENSAYO LEFRANC (m/s)	4,50E-03	6,80E-09	1,94E-04	8,34E-04	29
ÁNGULO DE ROZAMIENTO	38,3	35,4	36,7	1,13	6
COHESIÓN EFECTIVA (kPa)	17	0	3,4	7,7	6

En esta unidad, no es frecuente la presencia de niveles arcillosos activos.

En la tabla 2 se resumen sus propiedades típicas (se han eliminado valores extremos, presumiblemente anómalos).

La fracción fina de las arenas de miga presenta una plasticidad baja, aunque no despreciable (fig. 4.2).

Como se aprecia en la fig. 4.3 las resistencias a la penetración estándar (N_{SPT}) son muy variables, aunque con el lógico crecimiento con la profundidad. En superficie son anómalos valores inferiores a $N_{SPT} = 25$, pudiendo esperarse valores superiores a $N_{SPT} = 40$ a partir de los 15 m de profundidad. No obstante son frecuentes valores de rechazo ($N_{SPT} > 100$ golpes/30 cm) desde niveles muy superficiales.

Los módulos presiométricos (fig. 4.5) son también muy variables, si bien gran parte de los resultados se encajan en el intervalo 400-800 kp/cm², con bastantes valores superiores a 1000 kp/cm². Aunque la correlación no es muy buena la variación del módulo con la profundidad podría expresarse por la relación media (fig. 4.6):

$$E = 45 z \quad (\text{kp/cm}^2, \text{ con } z \text{ en metros})$$

Lógicamente los valores son muy bajos en las proximidades de la superficie, pero también se miden valores bajos en acuíferos profundos saturados, probablemente por producirse un cierto sifonamiento de las arenas.

Normalmente puede contarse con ángulos de rozamiento elevados (35°-36°), si bien la cohesión es prácticamente nula cuando el contenido de finos es inferior al 15%. Con contenidos del 15 al 25% es frecuente obtener alguna cohesión. Así por ejemplo Escario (1985) cita valores de $c' = 0,2$ a $1,2$ kp/cm² con $\phi' = 31^\circ$ para arenas con 20% de finos.

Es conocido que las arenas de miga pueden presentar una cierta cohesión por cementación diagenética, probablemente derivada de los feldespatos. Por otra parte estas arenas desa-

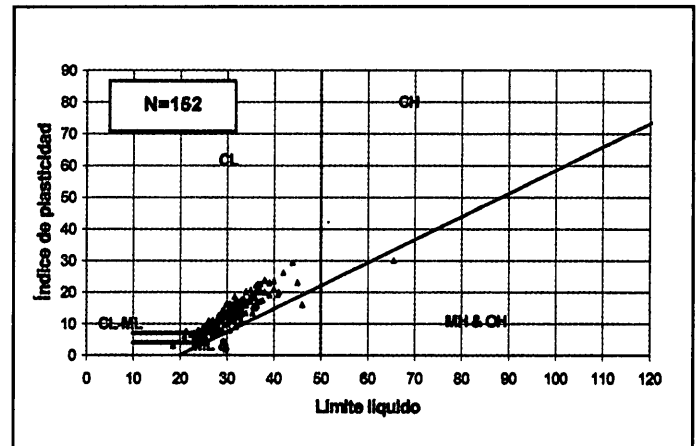


Figura 4.2. Plasticidad de las arenas de miga en el gráfico de Casagrande.

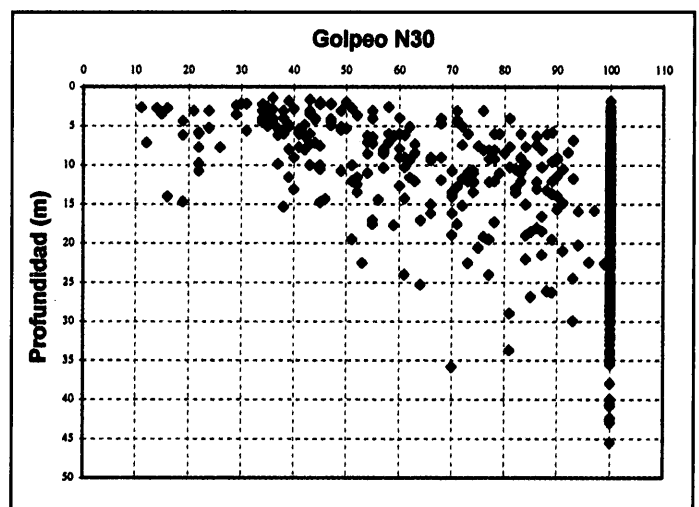


Figura 4.3. Relación entre la profundidad y el golpeo N₃₀ del ensayo SPT de la arena de miga.

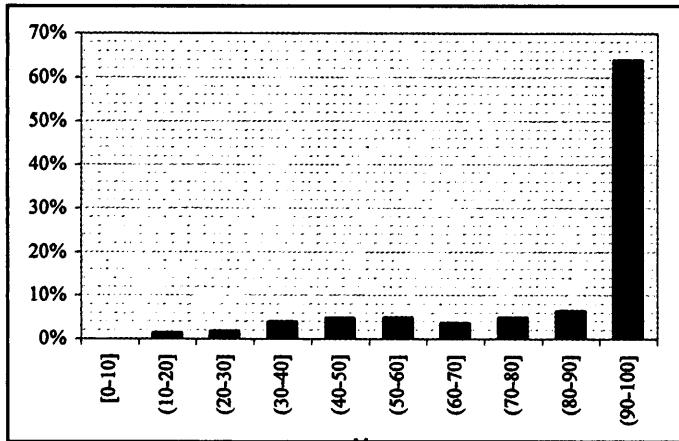


Figura 4.4. Distribución del N₃₀ del SPT en la arena de miga. (Frecuencias relativas).

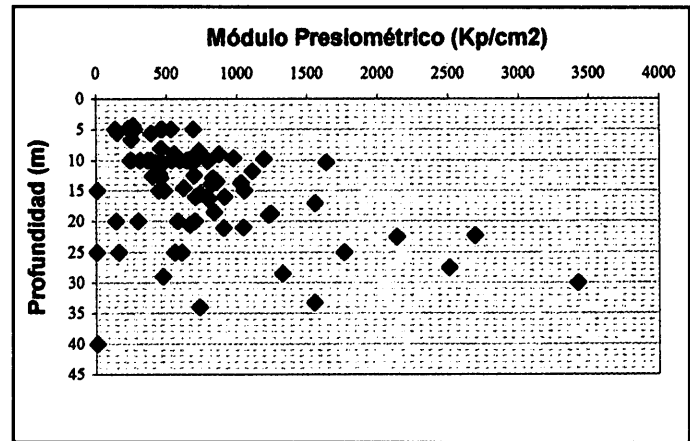


Figura 4.6. Distribución del módulo presiométrico con la profundidad en las arenas de miga.

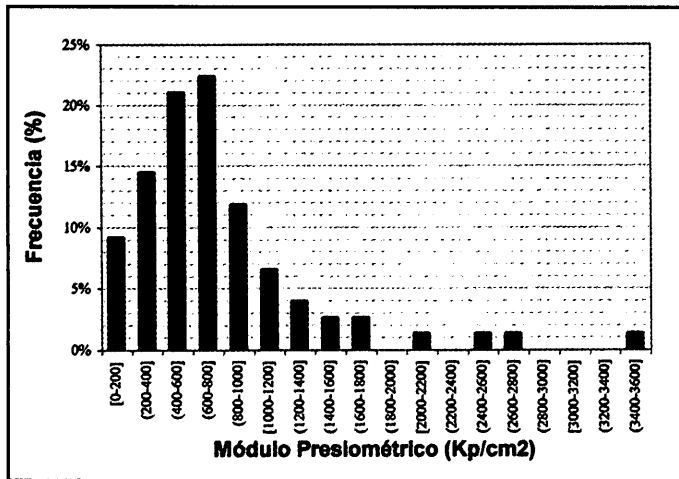


Figura 4.5. Distribución del módulo presiométrico en la arena de miga. (Frecuencias relativas).

cohesión puede perderse fácilmente por soleamiento prolongado o por lluvias o saturación accidental.

La observación de los resultados de ensayo está llevando a la conclusión de que la separación de las arenas de miga por el 25% de finos no es adecuada ya que diversas propiedades como la resistencia al corte o la permeabilidad presentan variaciones importantes entre los suelos con 0-15% y 15-25% de finos. Quizá habría que crear la categoría de "arenas arcillosas" entre las "arenas de miga" y las "arenas tosquizas".

4.5. Arenas tosquizas y toscos arenosos

Se trata de suelos de transición correspondientes a cambios laterales o verticales en la sedimentación en una fase en que aumentaron los aportes de finos respecto a los de las arenas de miga. Estas formaciones son bastante potentes y en ellas suelen encajarse gran parte de las cimentaciones de la mitad norte de la ciudad.

Como podía esperarse sus propiedades son intermedias entre las de las arenas de miga y las del tosco. Se resumen en la tabla 3.

rollan una cohesión capilar apreciable (1-2 t/m²) en estado no saturado, la cual justifica el mantenimiento de taludes verticales de excavación con alturas de 6 u 8 m. No obstante esta

TABLA 3. ARENA TOSQUIZA-TOSCO ARENOSO

PROPIEDADES	MÁXIMO	MÍNIMO	MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA	Nº DE MUESTRAS
HUMEDAD %	79,4	2	14,7	4,93	463
DENSIDAD NATURAL (g/cm ³)	2,3	1,43	2,1	0,16	200
DENSIDAD SECA (g/cm ³)	2,16	1,2	1,8	0,15	385
PASO POR EL T. UNE 0.08 = T. ASTM Nº 200 (%)	90	4,1	42,6	11,47	1016
LÍMITE LÍQUIDO	153,3	15,4	36,0	8,52	779
LÍMITE PLÁSTICO	77,2	10,5	18,3	3,90	777
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	76,1	2	17,8	7,10	776
MÓDULO PRESIOMÉTRICO (Kp/cm ²)	2500	300	900	-	77
ÁNGULO DE ROZAMIENTO	47,8	20,3	29,0	5,52	57
COHESIÓN EFECTIVA (Kpa)	200	0	39,1	44,35	57

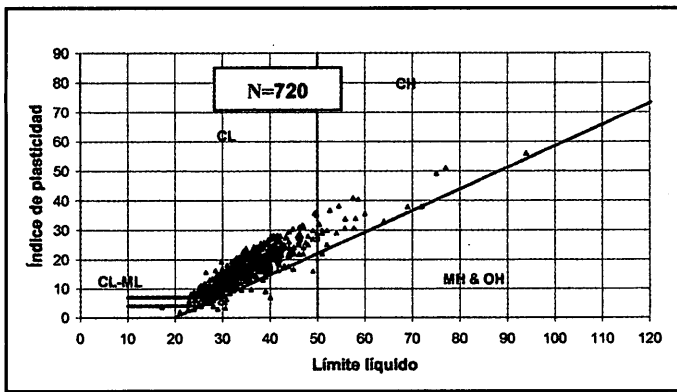


Figura 4.7. Plasticidad de las arenas tosquizas-toscas arenosas en el gráfico de Casagrande.

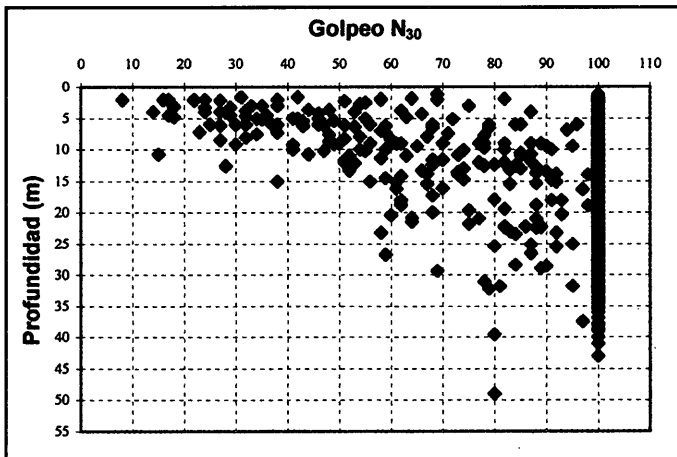


Figura 4.8. Relación entre la profundidad y el golpeo N_{30} del SPT en las arenas tosquizas-toscas arenosas.

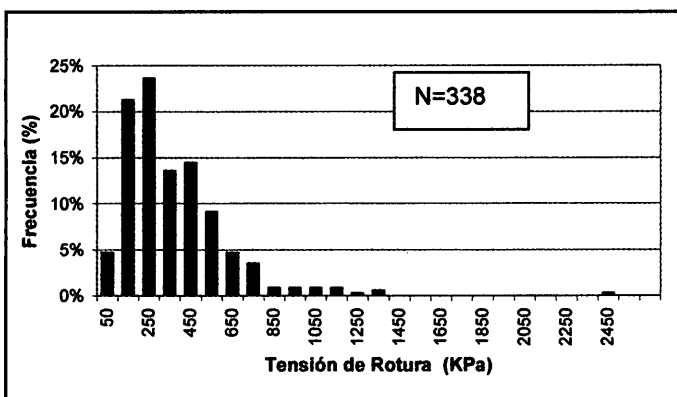


Figura 4.9. Compresión simple de las arenas tosquizas-toscas arenosas.

En la fig. 4.7 se representan las condiciones de plasticidad en el gráfico de Casagrande. Se observa que la mayor parte de las muestras podrían clasificarse como de baja plasticidad (límite líquido < 50%). Sin embargo existen niveles minoritarios de plasticidad media a alta y otros de naturaleza limosa.

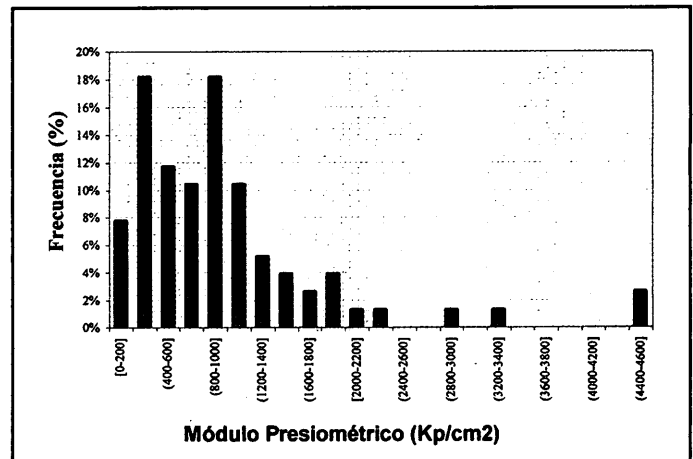


Figura 4.10. Distribución del módulo presiométrico en las arenas tosquizas-toscas arenosas.

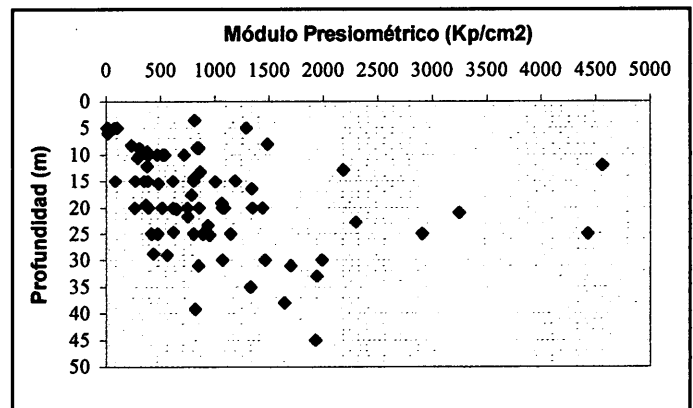


Figura 4.11. Distribución del módulo presiométrico con la profundidad en las arenas tosquizas-toscas arenosas.

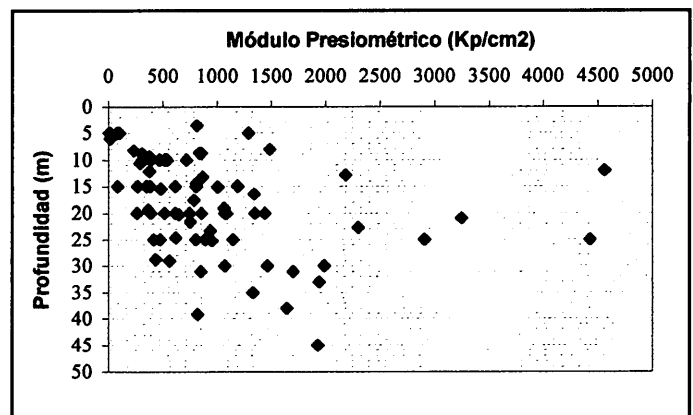


Figura 4.12. Ángulo de rozamiento en arenas tosquizas-toscas arenosas.

Su resistencia a la penetración estándar (fig. 4.8) muestra unas características muy semejantes a las de la arena de miga, con un aumento progresivo con la profundidad, aunque valores superiores a $N_{SPT} = 40$ ya se encuentran a partir de unos 10 m de profundidad.

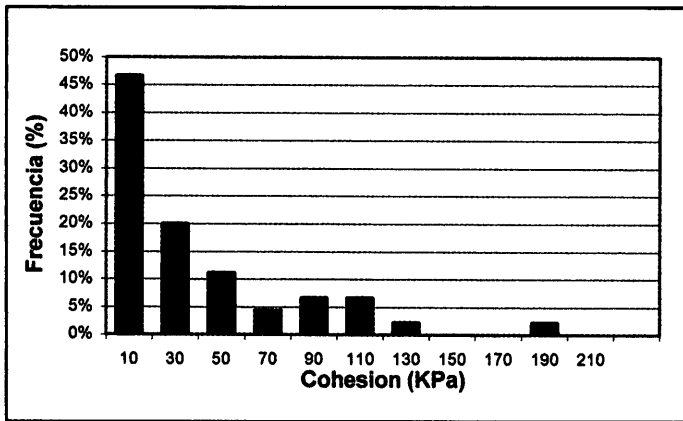


Figura 4.13. Cohesión efectiva en arenas tosquizas-toscas arenosos.

Las resistencias a compresión simple (fig. 4.9) muestran una concentración de valores en el entorno 1-5 kp/cm², si bien existen valores muy bajos correspondientes a muestras muy arenosas y otros que llegan a los 12 kp/cm².

Los módulos presiométricos (fig. 4.10) muestran dos familias de valores superpuestas. Para los toscos arenosos el módulo típico estaría en la gama 300-450 kp/cm², mientras que para las arenas tosquizas la mayor parte de los valores estaría en la gama 600-1200 kp/cm². No faltan valores en el intervalo 1200-4000 kp/cm². También se observa el lógico aumento del módulo con la profundidad (fig. 4.11), si bien la dispersión es mayor que en el caso de las arenas de miga.

Una separación menos nítida entre familias de valores se observa en lo referente a la resistencia al corte (figs. 4.12 y 4.13). Para las formaciones más arcillosas o tosquizas el ángulo de rozamiento interno puede oscilar típicamente entre 21° y 27°, con una cohesión de 70 a 150 kPa (7-15 t/m²), mientras que para los niveles más arenosos el ángulo de rozamiento interno se encuentra en la gama 29-37° (por supuesto hay valores superiores difíciles de garantizar), con cohesiones 10 a 60 kPa (1-6 t/m²).

Escario (1985) obtuvo valores del orden siguiente:

Arenas tosquizas $c' = 1 - 29 \text{ t/m}^2$ $\phi' = 45^\circ - 30^\circ$
 Toscos arenosos $c' = 0 - 14 \text{ t/m}^2$ $\phi' = 30^\circ - 25^\circ$

correspondiendo, lógicamente, las mayores cohesiones a los menores ángulos de rozamiento.

4.6. Toscos

Bajo la terminología de toscos se agrupa a un conjunto de materiales formado por sedimentos de color ocre o marrón con predominio arcilloso, siendo frecuente la aparición de arcosas, sepiolita y silex, que generalmente tienden a constituir niveles intercalados. Bajo una perspectiva geológica, esta unidad engloba el amplio conjunto de las Arcosas Inferiores, abarcando el registro cronoestratigráfico del Aragoniense inferior y medio que corresponde a la representación de la litofacies Madrid en las Unidades Tectosedimentarias Inferior y Media.

Esta unidad abarca la mayor extensión dentro del término municipal, en torno al 44 % de la superficie total.

En la tabla 4 se recoge un resumen de las propiedades más significativas.

Sus características granulométricas indican un neto predominio de las fracciones finas, con bastantes muestras con casi el 100% inferior a 0,08 mm.

La densidad seca se encuentra en la gama $\gamma_d = 1,80 \pm 0,19 \text{ t/m}^3$, con una media algo inferior a la encontrada por Escario (1985): $\gamma_d = (1,82 \text{ a } 1,91) \pm (0,05 \text{ a } 0,11) \text{ t/m}^3$.

Por lo que respecta a la plasticidad (fig. 4.14) la mayor parte de las muestras presenta un límite líquido inferior al 60%, quedando casi siempre representadas por encima de línea A de la Carta de Plasticidad de Casagrande, incluyéndose en el grupo de las arcillas de plasticidad baja a media. Sin embargo, destaca la presencia ocasional de capas mucho más plásticas, aunque de fácil identificación por cuanto su límite líquido se

TABLA 4. TOSCO

PROPIEDADES	MÁXIMO	MÍNIMO	MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA	Nº DE MUESTRAS
HUMEDAD %	97,9	1,86	20,0	8,22	348
DENSIDAD NATURAL (g/cm ³)	2,43	1,79	2,1	0,10	163
DENSIDAD SECA (g/cm ³)	2,16	1,21	1,8	0,19	304
PASO POR EL T. UNE 0.08 =T. ASTM N° 200 (%)	98,8	12,8	69,9	13,29	586
LÍMITE LÍQUIDO	125,2	25	44,8	13,69	584
LÍMITE PLÁSTICO	62,5	11,8	21,0	6,23	584
INDICE DE PLASTICIDAD	80,9	2,5	23,8	10,35	584
MÓDULO PRESIOMÉTRICO (Kp/cm ²)	5463	16,52	1346,3	1054,95	90
ÁNGULO DE ROZAMIENTO	49,2	9,5	27,8	5,93	70
COHESIÓN EFECTIVA (Kpa)	242	0	42,4	46,86	70

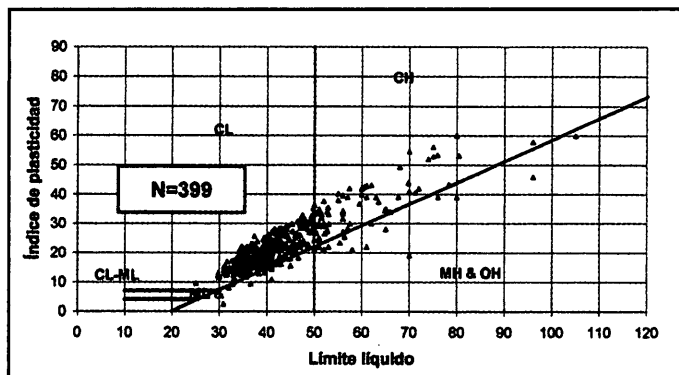


Figura 4.14. Plasticidad del tosco en el gráfico de Casagrande.

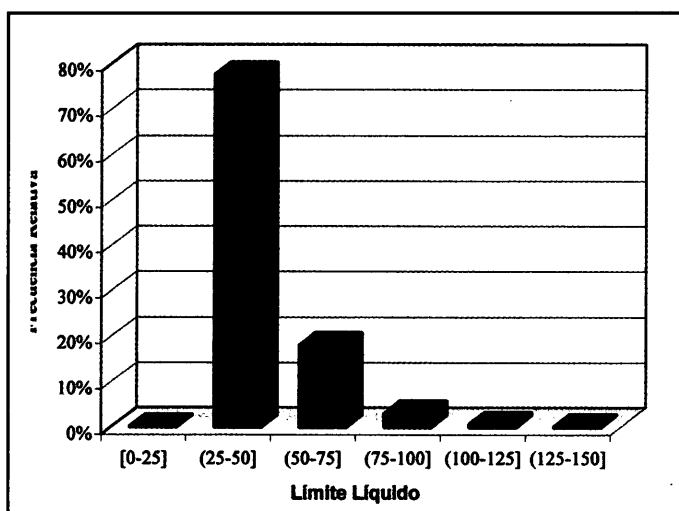


Figura 4.15. Frecuencias relativas al límite líquido del tosco.

encuentra en la gama 60% -> 100%, y suelen incluir sepiolitas y arcillas montmorilloníticas, sobre todo en los niveles más inferiores dentro de la unidad. Estos materiales de plasticidad elevada reciben la denominación de niveles o capas activas y suelen encontrarse asociados a carbonatos, dolomías e incluso sílex. En el histograma de frecuencias de la fig. 4.15 se observa la elevada proporción de muestras de plasticidad media a baja, aunque también hay niveles de plasticidad muy alta.

En los datos publicados por Escario (1985) la plasticidad media de los toscos resulta inferior a la obtenida en el Banco de Datos de la USAC ($w_L = 43,6 \pm 10,5 \%$) (Tabla 5).

TABLA 5

Localización	w_L medio	Desv. Típica
Línea 9	36,8 %	4,4 %
Zona de AZCA	34,7 %	5,7 %
Línea 6 (Cuatro Caminos-Pacífico)	34,3 %	4,2 %
Suburbano (Españoleto-S.Bernardo)	32,3 %	4,9 %
Línea 6 (C. Caminos - C. Universitaria)	33,9 %	4,4 %

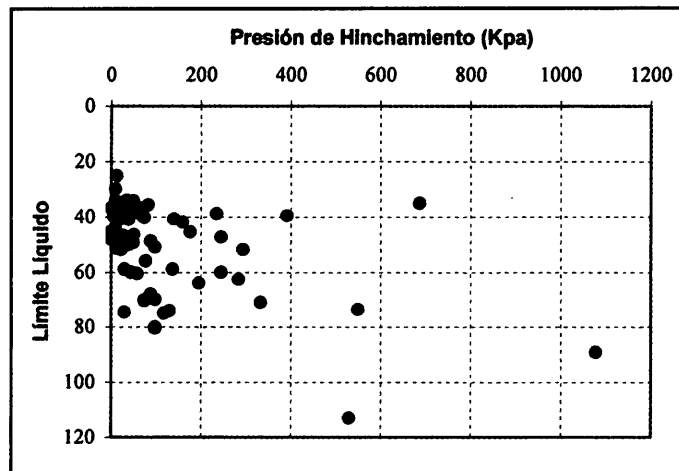


Figura 4.16. Relación presión de hinchamiento y límite líquido en el tosco.

Esta diferencia es lógica ya que en el Banco de Datos se consideran todos los resultados del área de Madrid.

El tosco suele asociarse a fenómenos de expansividad cuando aparece próximo a la superficie. En la fig. 4.16 se muestran las presiones de hinchamiento medidas en tosco, en función del límite líquido. Dentro de la gran dispersión se observa que en general las presiones son inferiores a 200 kPa (2 kp/cm²), existiendo casos que llegan hasta los 11 kp/cm². De todos modos valores superiores a 0,8 kp/cm² ya pueden considerarse peligrosos, por lo que esta formación merece atención respecto a este problema cuando se encuentra por encima del nivel freático y próxima a la superficie. En la fig. 4.17 se relaciona el hinchamiento libre con el límite líquido, encontrándose muchas muestras que superan el 1%.

Oteo (1991) ha publicado una correlación entre el límite líquido y el Índice de Lambe, pero al no haber diferenciado los toscos de las peñuelas y otras formaciones no puede aplicarse con carácter específico.

En contrapartida, la elevada preconsolidación que acusan estos materiales les confiere una elevada resistencia y por tanto capacidad portante, a pesar de su naturaleza eminentemente arcillosa. La resistencia a compresión típica (fig. 4.18) es del orden de 3,5 kp/cm² (350 kPa), con una gama de variación mas frecuente de 1,5 a 7,5 kp/cm². Algunos valores mas bajos pueden corresponder a muestras fisuradas o reblandecidas por contacto con un acuífero en carga. Otros valores de mayor resistencia pueden explicarse por desecación accidental o algún tipo de cementación o silicatación.

Escario (1985) obtuvo resistencias considerablemente mayores en sus ensayos correspondientes a AZCA y las Líneas 6, 7 y 9 de Metro, proponiendo la gama de valores típicos siguiente:

$$q_u = (10 \text{ a } 11) \pm (4 \text{ a } 5) \text{ kp/cm}^2$$

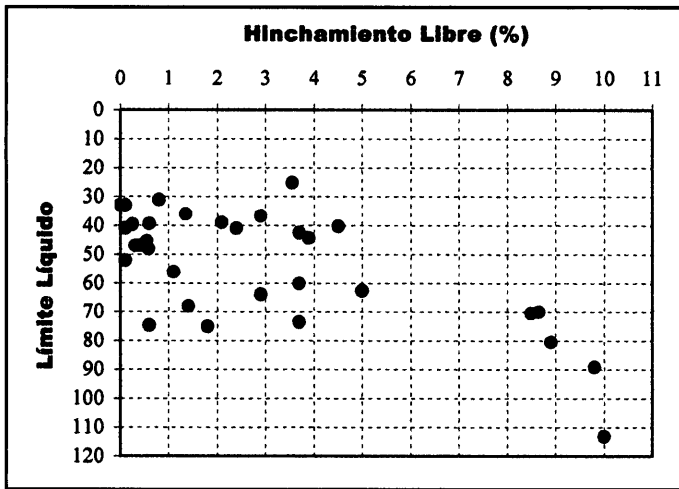


Figura 4.17. Relación hincharmento libre y límite líquido en el tosco.

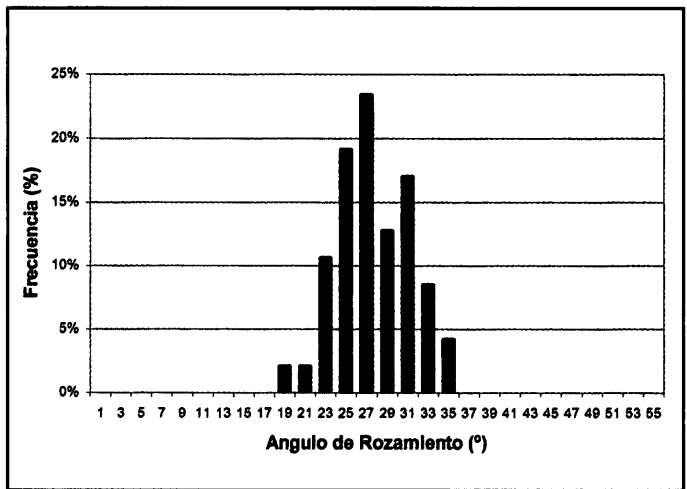


Figura 4.19. Ángulo de rozamiento en el tosco.

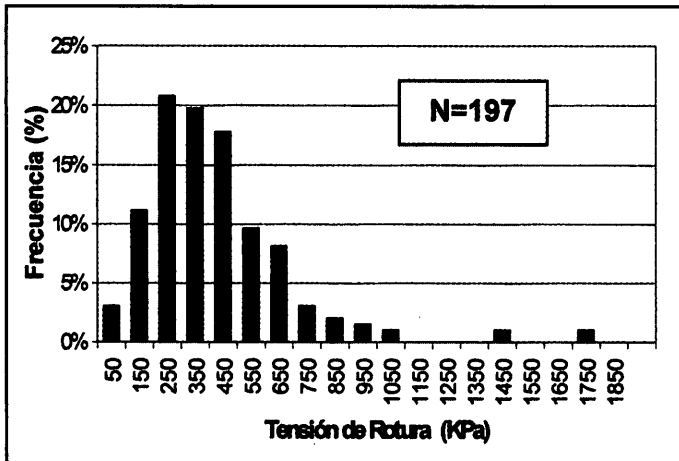


Figura 4.18. Compresión simple del tosco.

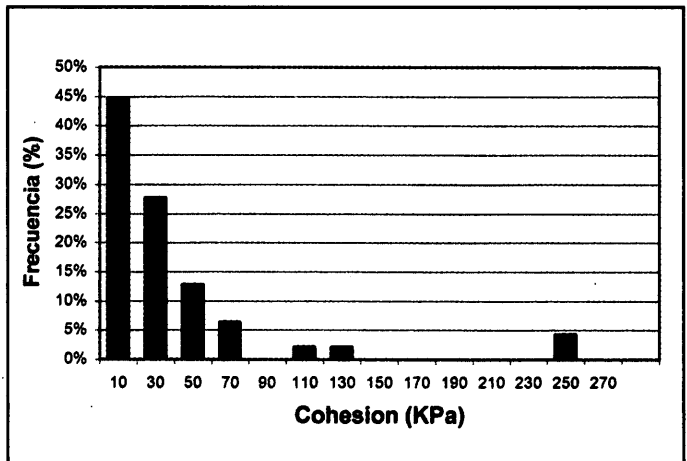


Figura 4.20. Cohesión efectiva en el tosco.

No obstante reconoce que posiblemente los ensayos se han realizado con las muestras mas competentes por lo que concluye que normalmente debe contarse con $q_u \geq 4 \text{ kp/cm}^2$, aunque muy probablemente se alcancen valores en la gama 8 -12 kp/cm^2 .

La resistencia al corte del tosco deducida de ensayos triaxiales convencionales adolece de alguna incertidumbre. Por un lado su baja permeabilidad impide una saturación correcta de las muestras y hace dudosos los resultados en los que se obtienen rozamientos muy bajos. Por otro lado su naturaleza expansiva hace que las resistencias sobre el material hinchado sean muy inferiores a las desarrollables in situ.

Tal como se aprecia en la fig. 4.19, podría contarse con valores típicos del ángulo de rozamiento efectivo de 24° a 33° , pudiendo relacionarse algunos valores menores con muestras fisuradas o los fenómenos antes mencionados. Los valores menores de rozamiento se corresponden con cohesiones efectivas en la gama 0,7-1,7 kp/cm^2 , mientras que los de ma-

yor rozamiento estarían asociados a $c' = 0,1$ a $0,7 \text{ kp/cm}^2$ (fig. 4.20).

Escarro (1985) solo incluye un ensayo CD que podría considerarse propiamente como tosco (# 200 = 66 %) resultando $c' = 0,35 \text{ kp/cm}^2$ y $\phi' = 26^\circ$, valores que quedan dentro de las horquillas antes citadas.

El mismo autor diferencia unas arcillas marrones "mas plásticas que el tosco normal", si bien su límite líquido está comprendido entre el 57 y el 70%. Para estas arcillas obtuvo $c' = 0$ a $2,7 \text{ kp/cm}^2$ y $\phi' = 15^\circ$ a 32° . Los valores mas bajos parecen corresponder a muestras con lisos.

Por lo que respecta a la resistencia a la penetración estándar es en general muy elevada, con cerca del 80% de los valores llegando al rechazo (fig. 4.21). Son típicos valores superiores a $N_{SPT} = 40$.

Los módulos presiométricos en el tosco presentan bastante dispersión (fig. 4.22) lo cual puede explicarse por la presencia de niveles mas blandos y deformables, generalmente a

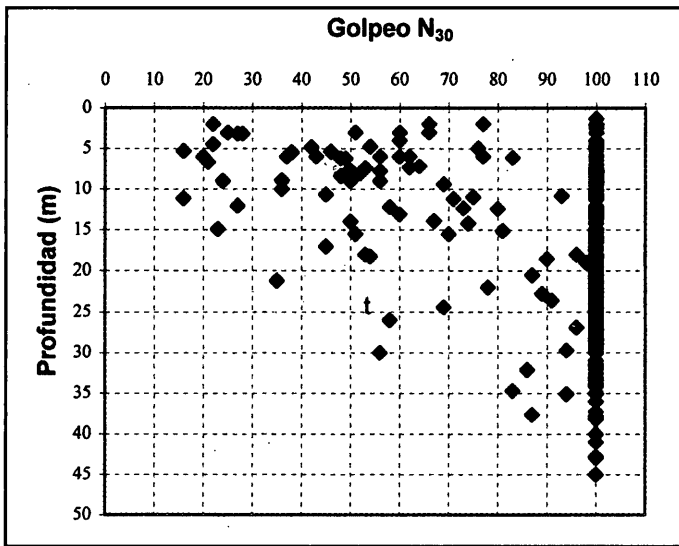


Figura 4.21. Relación entre la profundidad y el golpeo N₃₀ del ensayo SPT del tosco.

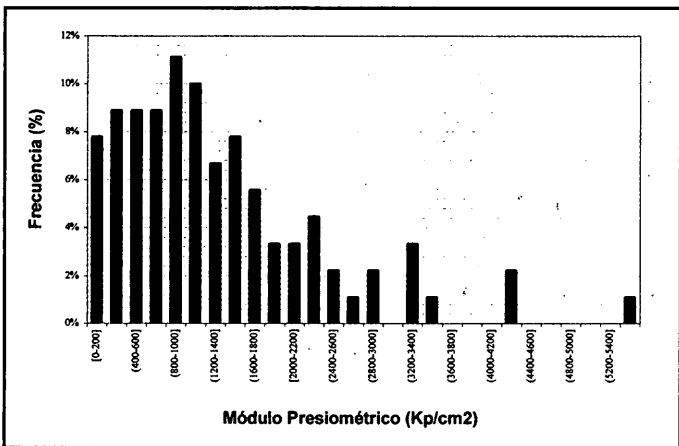


Figura 4.22. Distribución del módulo presiométrico en el tosco. (Frecuencias relativas).

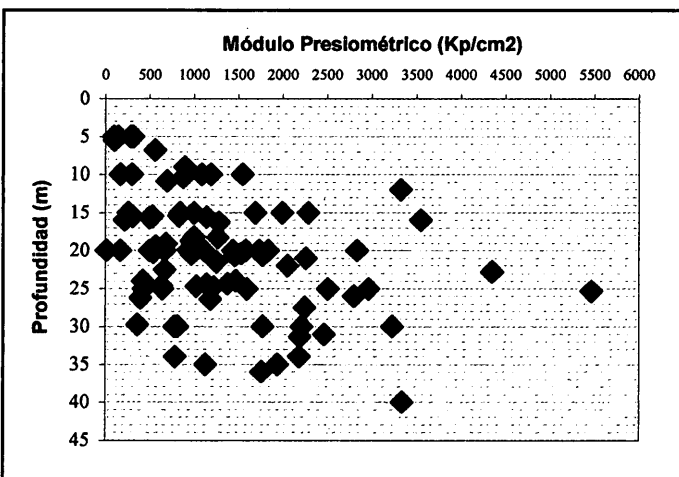


Figura 4.23. Distribución del módulo presiométrico con la profundidad en el tosco.

profundidades moderadas. Para estos casos el módulo podría ser inferior a 600 kp/cm². Sin embargo los valores mas típicos del tosco se encuentran en la gama 800-1400 kp/cm², habiéndose medido valores superiores a 3000 kp/cm².

También se observa el aumento del módulo con la profundidad (fig. 4.23) pero la dispersión es tan grande que resulta aventurado proponer una correlación única.

Es conocida la relación propuesta por Escario et al. (1981) a partir de ensayos de carga con placa y el análisis retrospectivo de los asientos de un edificio en AZCA:

$$E \text{ (Mpa)} = 100 + 40 z$$

siendo z la profundidad.

P. de la Fuente (1984) llevó a cabo numerosos ensayos de carga horizontal con placa, obteniendo un menor gradiente de crecimiento del módulo con la profundidad, por debajo de la cota 680:

$$E \text{ (Mpa)} = (75 \text{ a } 250) + (3,6 \text{ a } 13) z$$

El CEDEX ha realizado numerosos ensayos presiométricos a profundidades entre 10 y 30 m, obteniéndose relaciones similares a la de Escario para deformaciones en torno a 10⁻³. Con deformaciones mayores, del orden de 10⁻², el módulo a profundidades entre 20 y 30 m no supera los 200 Mpa. Sin embargo, con deformaciones muy pequeñas (10⁻⁴ a 5x10⁻⁵) el módulo puede alcanzar los 700-800 Mpa.

Estas conclusiones son interesantes ya que en muchos problemas geotécnicos las deformaciones son muy pequeñas y pueden ser muy pesimistas los desplazamientos obtenidos a partir de los módulos deducidos de ensayos convencionales.

No es frecuente la aparición de niveles potencialmente agresivos dentro de esta unidad (elevado contenido en sulfatos), si bien debe considerarse algo superior al que presentan las arenas de miga.

La presencia de aguas subterráneas dentro de esta unidad no puede considerarse despreciable, por cuanto corresponden en general a niveles colgados canalizados a través de las intercalaciones arenosas, que suelen corresponder a paleocauces con cierto grado de interconexión lateral, de manera que en profundidad se crea una cierta red de drenaje subterráneo en conexión con las áreas de recarga sitas en los dominios de la arena de miga; estos acuíferos se caracterizan por permeabilidades medias a bajas, escasa capacidad de almacenamiento y condiciones generalmente artesianas, dado que se encuentran confinados por el conjunto arcilloso.

4.7 Transición tosco-peñuela

En los sectores Sur y Este del término municipal aparece un conjunto de materiales que adquiere una personalidad pe-

TABLA 6. TRANSICIÓN TOSCO/PEÑUELA

PROPIEDADES	MÁXIMO	MÍNIMO	MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA	Nº DE MUESTRAS
HUMEDAD %	69	13,1	27,6	12,23	48
DENSIDAD NATURAL (g/cm ³)	2,12	1,42	1,9	0,21	13
DENSIDAD SECA (g/cm ³)	1,87	0,9	1,5	0,23	40
PASO POR EL T. UNE 0.08 =T. ASTM Nº 200 (%)	100	3,3	74,8	22,65	104
LÍMITE LÍQUIDO	169	29	58,8	23,30	109
LÍMITE PLÁSTICO	79	15,3	31,1	10,94	109
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	90	5	27,7	14,88	109
MÓDULO PRESIOMÉTRICO (Kp/cm ²)	1958	858	1368	554	5
ÁNGULO DE ROZAMIENTO	46	11,3	32,0	10,88	10
COHESIÓN EFECTIVA (Kpa)	772	0	153	241	10

culiar, al estar constituidos por niveles arcillosos carbonatados, arcillas arenosas y arcillas verde-azuladas, entre los que destaca la frecuente existencia de sepiolitas y bentonitas, las cuales suelen aparecer entremezcladas o en forma de estratos

aislados cuyo espesor no suele superar los dos metros. Con menor frecuencia aparecen sílex y materiales calcáreos e incluso dolomíticos.

Se trata de un conjunto heterogéneo cuya localización se sitúa lógicamente en el límite entre el tosco y la peñuela, si bien en ocasiones aparece inmerso en los toscos. El espesor de este conjunto se estima en torno a la decena de metros y su edad ha podido establecerse como inmediatamente infraacente al Ponticense, en función de los restos fósiles encontrados, lo que restringe su formación a la Unidad Tectosedimentaria Intermedia, no apareciendo en la Superior (Tabla 6).

Las características granulométricas de estos materiales los asimilan fundamentalmente a arcillas y de acuerdo a sus límites de Atterberg se localizan casi siempre por encima de la línea A de la Carta de Plasticidad de Casagrande, dentro del campo de las arcillas de plasticidad media a alta (fig. 4.24).

En general, se trata de una unidad con características resistentes muy variables, como confirman las fuertes dispersiones que se aprecian en los resultados de los ensayos de resistencia a compresión simple (fig. 4.25). Los valores típicos estarían en la gama 6,5 a 8,5 kp/cm².

También hay grandes variaciones en las resistencias a la penetración estándar (fig. 4.26) apreciándose que pueden existir valores inferiores a N_{SPT} = 40 incluso a profundidades superiores a 20 m. No obstante son frecuentes (casi el 60%) los valores de rechazo y resistencias típicas en torno a N_{SPT} = 50.

Esto se refleja en los módulos presiométricos que en general son elevados, en la gama 800-2000 kp/cm², pudiendo proponerse una ley del tipo

$$E = 500 + 10 z \text{ (kp/cm}^2\text{)}$$

con la profundidad z en metros.

La determinación de la resistencia al corte tropieza con los mismos problemas ya indicados para el tosco, pudiendo contar con valores del ángulo de rozamiento entre 22 y 30° y cohesiones entre 0,2 y 1,5 kp/cm².

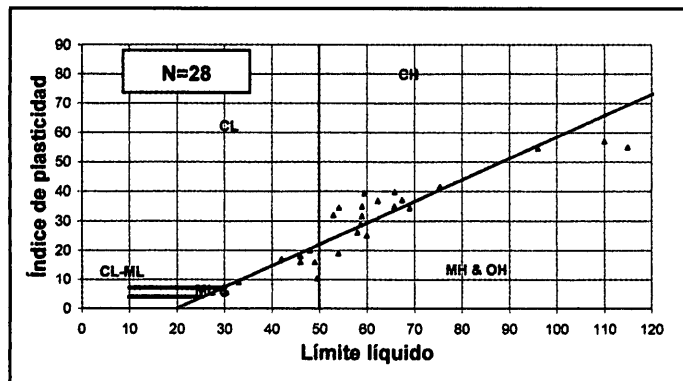


Figura 4.24. Plasticidad de la transición tosco-peñuela en el gráfico de Casagrande.

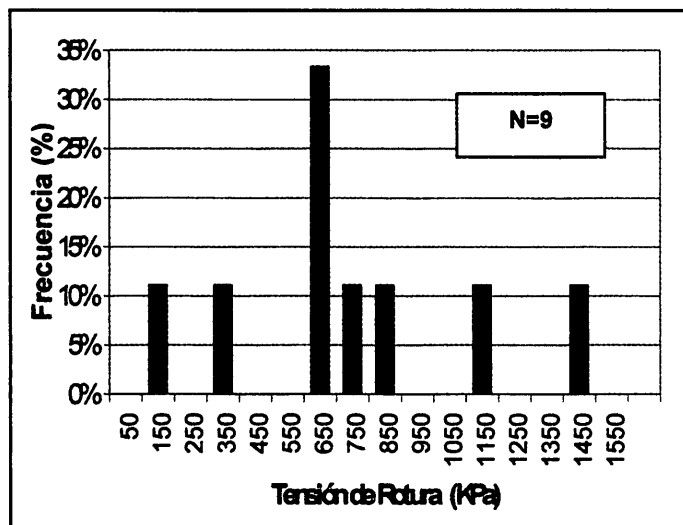


Figura 4.25. Compresión simple de la transición tosco-peñuela.

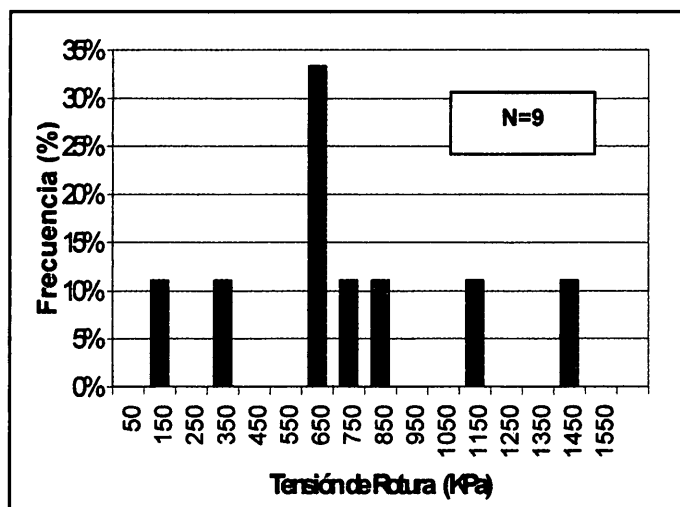


Figura 4.26. Relación entre la profundidad y el golpeo N₃₀ en el SPT en la transición tosco-peñuela.

El contenido en sulfatos es bajo, por lo que no suelen plantear problemas de agresividad a los hormigones convencionales.

4.8. Peñuelas

Esta unidad se localiza en la margen meridional central y oriental del término, apareciendo por debajo del tosco y de los materiales de transición. Está constituida por un conjunto litológico de lutitas o arcillas fuertemente litificadas por sobreconsolidación o cementaciones carbonatadas, de coloraciones fundamentalmente gris verdoso-azulada con episodios marrones de alteración.

De forma generalizada, es frecuente la presencia de intercalaciones muy carbonatadas, de color blanquecino, que reciben la denominación de "cayuelas", junto a tablas y segregaciones nodulares de sílex, más abundantes en determinadas zonas, cuya aparición frecuentemente se asocia a las cayuelas. De forma muy subordinada, aparecen lentejones y capas

de arenas e incluso areniscas, en las que son características las tonalidades verdosas y una fuerte presencia de micas.

Dentro de estos materiales destaca la presencia de litoclasas o planos de fracturación estriados, tipo "slickenside" en la terminología geológica, y que coloquialmente reciben la denominación de "lisos". Parecen corresponder a superficies de fractura que han acusado cierto desplazamiento relativo entre sus labios y cuyo origen no está suficientemente contrastado, si bien en la bibliografía suelen barajarse dos hipótesis: una de ellas alude a un origen tectónico, ligado a reajustes reflejo de los movimientos de bloques del Sistema Central, la otra hipótesis apunta un origen atectónico, en cuyo caso constituirían las respuestas superficiales a movimientos de reajuste suscitados por la disolución de los yesos basales. También existe una marcada microfracturación, posiblemente asociada a fenómenos de cambio de volumen.

Esta unidad parece alcanzar un espesor de unos 60 m y corresponde a las facies verdes o de transición, cuya aparición en el registro cronoestratigráfico se localiza en la Unidad Tecosedimentaria Intermedia, de edad Aragoniense medio.

Dentro de esta unidad, entre las cotas 590-620, aparece una intercalación discontinua de color gris oscuro, mucho más blanda que las peñuelas verdes, que ha sido denominada "capa negra" por algunos autores; se trata de un conjunto integrado fundamentalmente por arcillas de colores grisáceos a negruzcos con abundante presencia de materia orgánica, en forma de niveles milimétricos a centimétricos (Tabla 7).

Las peñuelas son arcillas muy plásticas, con límite líquido habitualmente en el intervalo 50%-90%, que se localizan en el campo de las arcillas de alta plasticidad dentro de la Carta de Plasticidad de Casagrande (fig. 4.27). En algunos niveles particularmente activos se han determinado límites líquidos de 100 a 250%.

Según la posición geográfica, la arcilla principal es de tipo montmorillonítico, un interestratificado de montmorillonita y sepiolita o predominantemente sepiolita. En este mismo sentido los puntos se van trasladando en el Gráfico de Plasticidad perpendicularmente a la Línea "A", correspondiendo las sepio-

TABLA 7. PEÑUELA

PROPIEDADES	MÁXIMO	MÍNIMO	MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA	Nº DE MUESTRAS
HUMEDAD %	65,4	18,2	34,3	10,18	113
DENSIDAD NATURAL (g/cm ³)	2,2	1,67	1,9	0,11	55
DENSIDAD SECA (g/cm ³)	1,8	0,96	1,4	0,18	95
PASO POR EL T. UNE 0.08 =T. ASTM Nº 200 (%)	100	39	91,0	12,86	143
LÍMITE LÍQUIDO	220,5	39	70,3	18,29	174
LÍMITE PLÁSTICO	66	15,9	33,5	8,57	173
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	157	14	36,9	15,32	173
MÓDULO PRESIOMÉTRICO (Kp/cm ²)	1765	50	545	464	60
ÁNGULO DE ROZAMIENTO	33	19	29	12,50	14

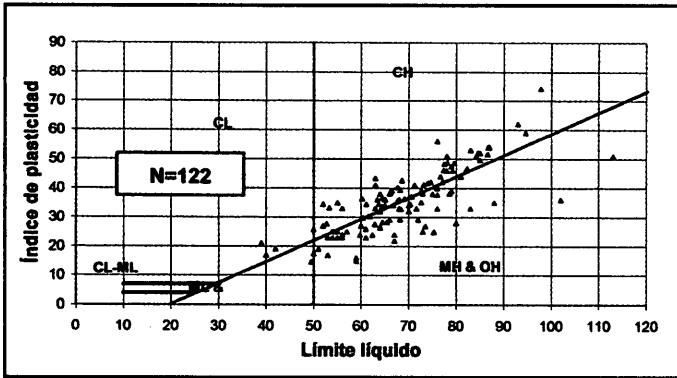


Figura 4.27. Plasticidad de la peñuela en el gráfico de Casagrande.

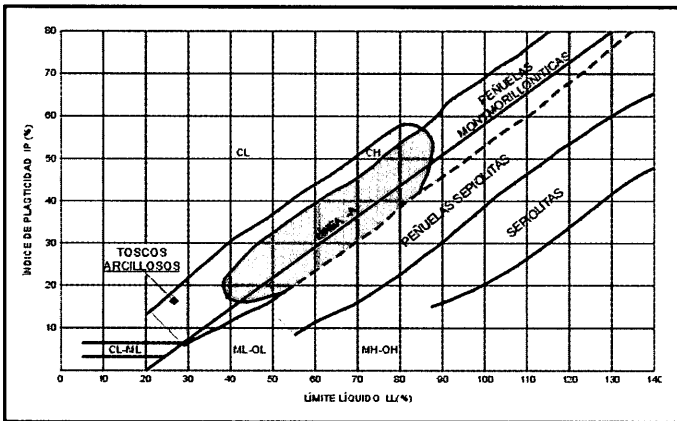


Figura 4.28. Localización en el gráfico de plasticidad de las arcillas del área de Madrid.

litas a los puntos que entran en el dominio MH&OH, sin que tengan lógicamente nada que ver con los limos (fig. 4.28). Es característico de las sepiolitas el bajo peso específico (1,4 a 0,9 t/m³).

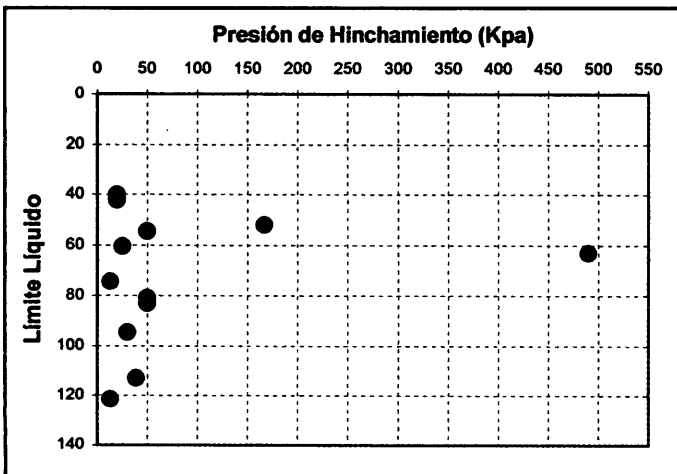


Figura 4.29. Relación presión de hinchamiento y límite líquido de la peñuela.

La expansividad de las peñuelas es proporcional al contenido de montmorillonita, aunque, en general, podría hablarse de una expansividad potencial inferior a la del tosco. Las presiones de hinchamiento (fig. 4.29) suelen ser típicamente inferiores a 0,6 kp/cm², aunque en algunos niveles puede llegarse a los 5 kp/cm². Los hinchamientos libres están comprendidos, típicamente, entre el 0,8 y el 7,5% (fig. 4.30).

Como alude la propia denominación “peñuela”, adoptada en la terminología tradicional, se trata de materiales muy compactos y resistentes, en general.

Sin embargo, dentro de este conjunto litológico destaca la aparición de niveles cuya consistencia es mucho menor, aparte de las “capas negras” anteriormente referidas. Se reconocen tres tipos de peñuelas relativamente blandas:

- ▼ Peñuela gris oscuro: se trata de materiales arcillosos con fuerte presencia de materia orgánica, en cierto modo muy similares a las capas negras, que se localizan justo sobre el contacto con la unidad yesífera infrayacente y cuyo espesor oscila entre los 2 a 5 m. Ni su extensión, ni su origen se encuentran suficientemente contrastados, aunque se cree que están asociados a fenómenos de disolución de los yesos infrayacentes.
- ▼ Peñuela reblandecida: corresponde a niveles extremadamente meteorizados bien por erosión de los niveles más superiores o bien por encontrarse en las proximidades de cauces hídricos.
- ▼ Peñuelas erosionadas y redepositadas: se trata realmente de materiales cuaternarios, que en ocasiones pueden confundirse con los niveles de alteración del substrato miocénico.

Esta variabilidad se detecta en los resultados de resistencia a la penetración estándar (figs. 4.31 y 4.32). Como puede

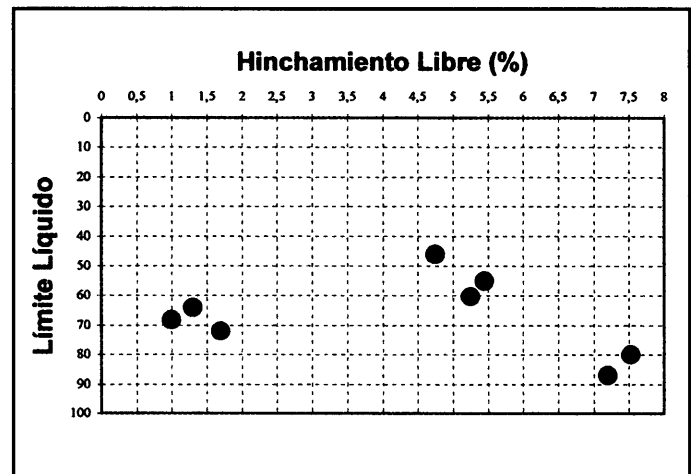


Figura 4.30. Relación hinchamiento libre y límite líquido de la peñuela.

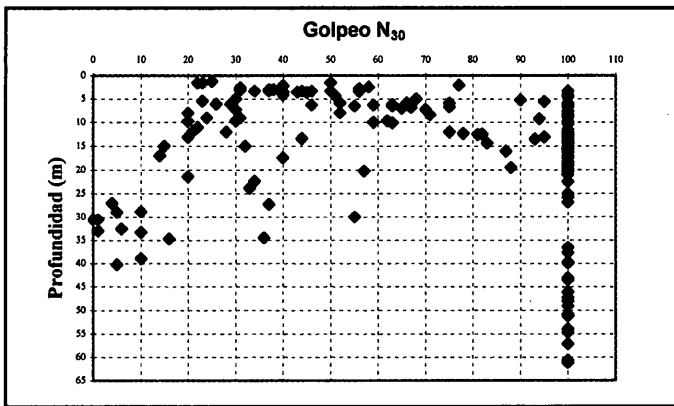


Figura 4.31. Relación entre la profundidad y el golpeo N₃₀ del ensayo SPT de la peñuela.

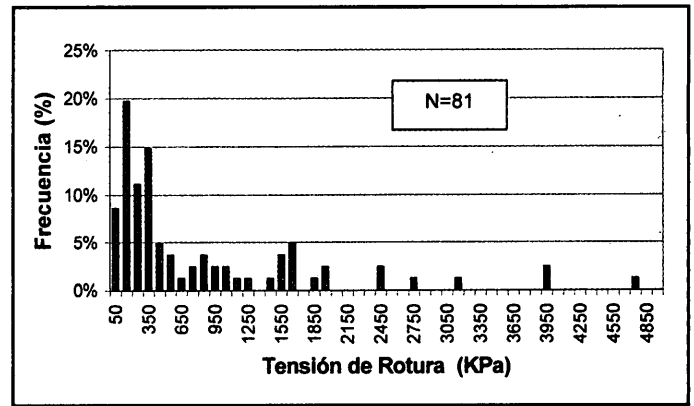


Figura 4.33. Resistencia a compresión simple de la peñuela.

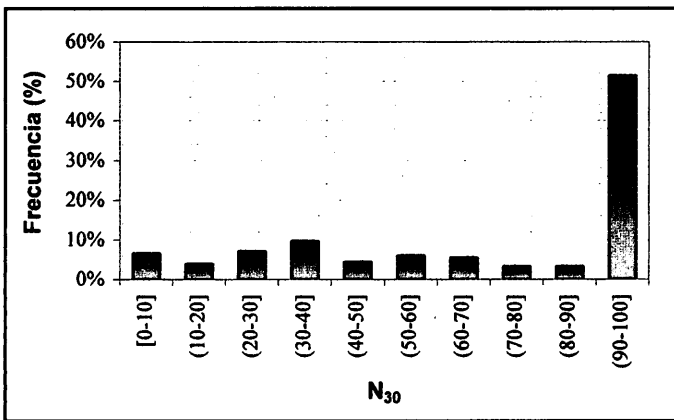


Figura 4.32. Distribución del N₃₀ del SPT en la peñuela.

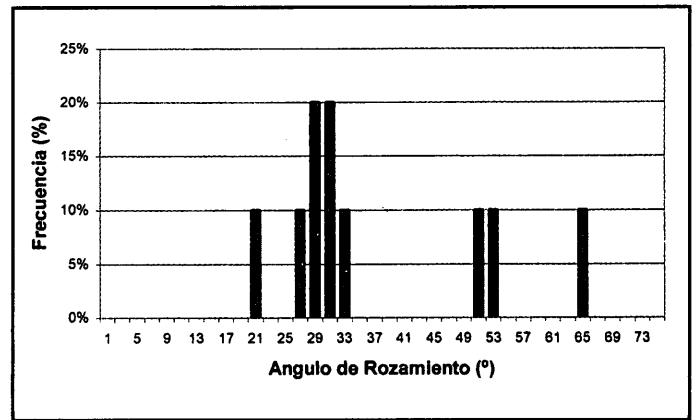


Figura 4.34. Ángulo de rozamiento en la peñuela.

observarse existen niveles de baja compactación a profundidades entre 25 y 40 m. Aunque son frecuentes los rechazos, la dispersión de resultados es muy alta, con valores de 20 a 100 en los primeros 10 m.

También se obtienen resultados muy variables en el ensayo a compresión simple (fig. 4.33), estando los valores típicos entre 1 y 4,5 kp/cm². Existen valores muy bajos que pueden corresponder a peñuelas reblandecidas o a peñuelas fisuradas. También existen valores muy elevados, de 8 a 20 kp/cm² o incluso superiores, que corresponden a zonas de baja humedad, fuertemente preconsolidadas o a niveles cementados.

Escario (1985) obtuvo resistencias medias de unos 15 kp/cm² con muestras de la Línea 6 (Pacífico-Oporto) y Línea 9. Los valores variaban de 4 a 30 kp/cm², mientras que para peñuelas blandas en la zona del Manzanares la gama de variación era de 2 a 5 kp/cm².

La conclusión es que la resistencia de las peñuelas depende mucho de la humedad natural o, más probablemente, del índice de consistencia.

Análoga dispersión se observa en los valores de resistencia al corte determinados en ensayos triaxiales (figs. 4.34 y 4.35). Las cohesiones efectivas varían de 1 a 9 t/m², con algunos re-

sultados de 20 a 50 t/m² para muestras cementadas o silicatadas, mientras que el ángulo de rozamiento interno varía típicamente de 27° a 33°. En muestras cementadas se han medido valores superiores a 50°.

Escario (1985) realizó ensayos triaxiales CD, obteniendo la siguiente gama de valores:

$$c' = 1 \text{ a } 3,6 \text{ kp/cm}^2$$

$$\phi' = 27^\circ \text{ a } 37^\circ \text{ (con algunos valores de } 42^\circ \text{ y } 52^\circ)$$

Algunos ensayos realizados según los "lisos" en una peñuela de alta plasticidad ($w_L = 99$ a 128 %) indicaron valores de pico en torno a los 14° y residuales de 12,5° a 9°. Estos valores tan bajos obligan a ser cautos en problemas con riesgo de rotura progresiva.

Los módulos presiométricos (figs. 4.36 y 4.37) son muy sensibles a las condiciones de humedad y al reblandecimiento antes mencionado. Las peñuelas "blandas" indican módulos menores de 200 kp/cm². Existen peñuelas de deformabilidad intermedia, con módulos en el intervalo 200-800 kp/cm² y muchos casos en que las peñuelas poseen módulos en la gama 800-1800 kp/cm². P. de la Fuente (1991) cita módulos deduci-

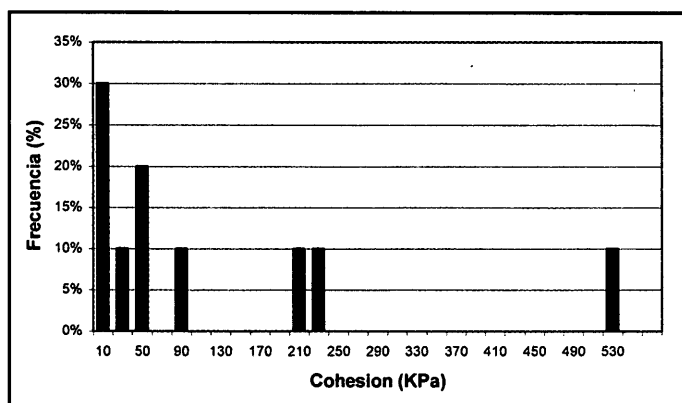


Figura 4.35. Cohesión efectiva la peñuela.

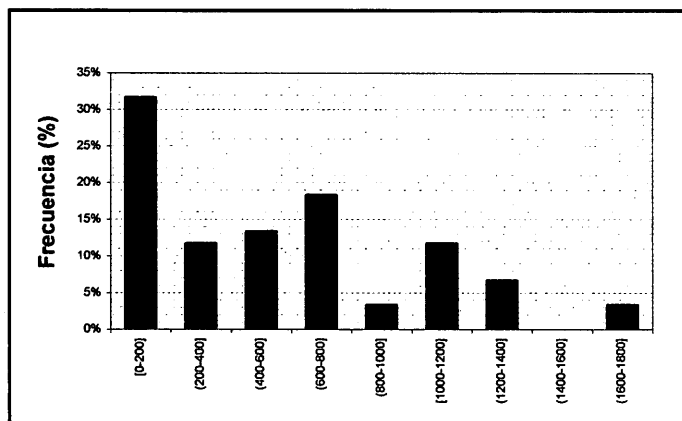


Figura 4.36. Distribución del módulo presiométrico en la peñuela. (frecuencias relativas).

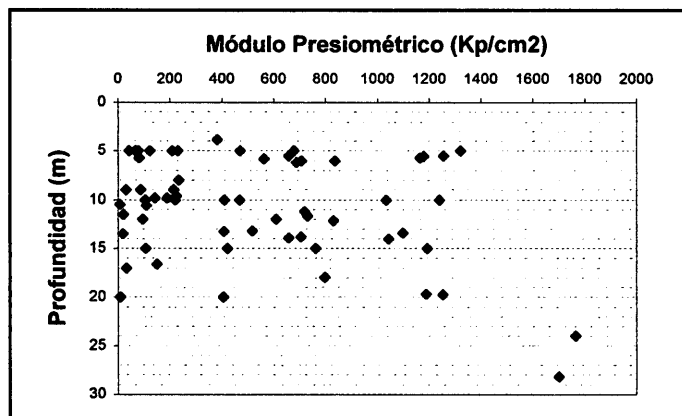


Figura 4.37. Distribución del módulo presiométrico en la peñuela.

dos de ensayos de carga con placa en la Línea VI, de 1350 a 8250 kp/cm², mientras que los ensayos de carga horizontal daban valores todavía mayores, en el intervalo 4500-9300 kp/cm². Es interesante esta comprobación de la anisotropía de deformabilidad, asociada a una tectónica de fuertes empujes horizontales.

4.9. Formaciones yesíferas: arcillas con yesos y yesos con arcillas

Aunque existen niveles mas o menos potentes de yesos masivos, generalmente de tipo sacaroides, las formaciones yesíferas que aparecen en el término municipal de Madrid suelen agruparse en dos unidades geotécnicas: arcillas con yesos y yesos con arcillas, según la relación de predominio o subordinación relativa entre ambos términos. Ambas unidades constituyen una importante extensión superficial en el cuadrante SE de Madrid, correspondiendo a las arcillas con yesos una extensión de 29 km², jalonando el cauce del río Manzanares desde la confluencia del antiguo arroyo de Abroñigal.

La unidad de yesos con arcillas está constituida fundamentalmente por yesos masivos y ocupa una extensión de unos 7 km². Se localiza en forma de dos retazos en el margen oriental del término municipal.

Los términos arcillosos o peñuelas que aparecen interstratificados con los yesos tienen coloración gris oscura y presentan una naturaleza mineralógica fundamentalmente illítica; en ocasiones aparecen muy enriquecidos en carbonatos o componentes magnesianos.

Los términos evaporíticos aparecen en forma de niveles centimétricos tableados y nodulares cuando aparecen subordinados a las arcillas, mientras que cuando constituyen el término predominante corresponden a bancos masivos seleníticos o especulares, con espesores métricos. Su naturaleza mineralógica corresponde fundamentalmente a yeso, apareciendo la anhidrita de forma muy ocasional, con participación puntual de sales cálcicas y sódicas diversas. En ocasiones, es frecuente que hacia el techo de la unidad se presenten niveles de yeso detrítico, en forma de arena muy fina.

Según los estudios de síntesis efectuados por el Ayuntamiento de Madrid, cabe destacar los siguientes rasgos geotécnicos para las unidades de las formaciones yesíferas:

- ▼ a) Elevado contenido en arcillas (pase tamiz 200 ASTM)
- ▼ b) Presencia de niveles muy expansivos, a tenor de los resultados de los ensayos Lambe.
- ▼ c) La fuerte presencia de yesos lógicamente implica un elevado contenido en sulfatos, con los conocidos problemas de agresividad a los hormigones convencionales.

Desde el punto de vista geotécnico, estas unidades adquieren unos rasgos extremadamente singulares debido a la presencia de fenómenos de karstificación. Aunque la disposición estructural general de los materiales dentro del término municipal es subhorizontal, destaca la presencia de perturbaciones diversas que rompen la continuidad en los materiales yesíferos. Aparentemente se trata de una fracturación a gran escala que aísla grandes bloques, cuya estratificación indica la existencia de basculamientos con rasgos anárquicos, ca-

rentes de condicionante estructural alguno. La existencia de estos bloques desgajados y basculados entre sí, se acompaña de plegamientos diversos, también con carácter escasamente estructurado, que ocasionalmente llegan a alcanzar fuertes magnitudes, apreciándose en algunos casos cobijamientos entre charnelas, etc. e incluso presencia de rasgos geomorfológicos tales como dolinas y cavernas con desarrollo limitado. Todo este conjunto de rasgos superficiales tiene un origen atectónico con bastante continuidad en el espacio, afectando a las peñuelas que se disponen como cobertera, y se deben a la perturbación de los yesos por fenómenos de disolución o karstificación.

Las últimas manifestaciones tectónicas en la estructuración alpina del Sistema Central originaron una serie de lineaciones estructurales en el sustrato previo a la sedimentación de los últimos pisos del registro miocénico, cuya existencia y posibles activación episódica se tradujo en la aparición de líneas de fracturación que afectarían fundamentalmente a los materiales yesíferos; la infiltración de las precipitaciones y posterior circulación de las aguas superficiales desencadena el proceso de karstificación o progresiva disolución de los materiales evaporíticos, en cuyo control y desarrollo también jugaron un importante papel los planos de estratificación. El resultado final es la generación de cavidades diversas, cuyo desarrollo se ve truncado cuando el peso de la cobertera supera la resistencia de los materiales que constituyen la clave de la cavidad, sobreviniendo un posterior colapso que deforma las litologías que constituyen la cobertera, favoreciéndose el desarrollo de rasgos estructurales de deformación plástica que, por otra parte, es característica en los yesos.

Esta serie de rasgos origina una problemática geológica en dos vertientes, la primera corresponde a la existencia de cavidades cuya identificación y control de su extensión es extremadamente difícil desde superficie, por cuanto los sondeos constituyen la única herramienta que acredita plena fiabilidad, aunque existen técnicas geofísicas, microgravimetría, etc. que se emplean con éxito diuerso. La segunda es resultado del colapso de la cavidades y corresponde a la aparición de materiales extremadamente flojos y meteorizados, tanto como relleno de las antiguas cavidades, como constituyentes de la propia cobertera, afectada por la deformación atectónica que ha suscitado el colapso y que se encuentra retroalimentada por la circulación preferente de las aguas de infiltración a favor de las líneas de debilidad que se originan.

La humedad natural suele encontrarse en la gama 9-30%, mientras que la densidad aparente depende mucho del contenido en yesos, con valores desde 1,6 a 2,2 t/m³.

En general las formaciones yesíferas sanas dan rechazo a la penetración estándar y sus resistencias a la compresión simple son muy variables, en función del mayor o menor contenido de yeso. Son típicos valores del orden siguiente:

▼ Yesos masivos	80 – 220 kp/cm ²
▼ Yesos con arcilla	18 – 70 “
▼ Arcillas yesíferas	1,5 – 10 “

Los módulos presiométricos son también muy variables, aunque en general pueden esperarse valores en la gama 3000-15000 kp/cm². Cuando predomina la componente yesífera el efecto de la humedad puede conducir a valores muy bajos, inferiores a 150 kp/cm².

5. OTROS ASPECTOS GEOTÉCNICOS

Dentro de la caracterización geotécnica de los suelos de Madrid existen todavía algunas lagunas que se van completando lentamente. Quizá la principal incógnita se refiere al valor del K_0 , o coeficiente de empuje en reposo, relación entre la tensión efectiva horizontal y vertical.

En materiales normalmente consolidados este coeficiente es inferior a la unidad, pero en suelos sobreconsolidados puede llegar a valer 2 o incluso mas. El valor depende de la historia tectónica del estrato y de factores muy diversos como la cementación, diagénesis, expansividad, etc.

En medidas realizadas a finales de los 60 en algunas secciones de Metro se detectaron apreciables empujes horizontales, indicativos de valores elevados del K_0 , pero no pudieron llevarse a cabo comprobaciones específicas.

Hasta el momento se han propuesto valores del K_0 en el area de Madrid entre 0,4 y 1,8, correspondiendo los valores mas bajos a los rellenos, aluviales y arenas de miga, mientras que los mas altos serían aplicables a toscos y peñuelas.

Recientemente el CEDEX ha realizado pruebas con el presiómetro autoperforador en tosco, obteniendo valores del K_0 comprendidos entre 2 y 2,5. Estos valores están sujetos a discusión y confrontación con otras medidas ya que, de ser reales, habrían provocado estados tensionales atípicos en pantallas, revestimientos de túneles, etc.

6. PERMEABILIDAD Y AGUAS FREÁTICAS

Dentro de la problemática geotécnica ocupa un lugar muy importante la presencia del agua freática y sus características. Frente a capas de alta permeabilidad como las de arena de miga o determinados niveles de arenas limpias, el resto de las formaciones es de permeabilidad media a baja.

En los últimos tiempos se han realizado numerosos ensayos in situ de permeabilidad (o conductividad hidráulica, según la denominación moderna), predominantemente del tipo Lefranc. Sin embargo la calidad de los mismos es muy variable, probablemente por no existir capas granulares suficientemente potentes como para excluir la influencia de otras capas semiimpermeables, por lo que la interpretación de los

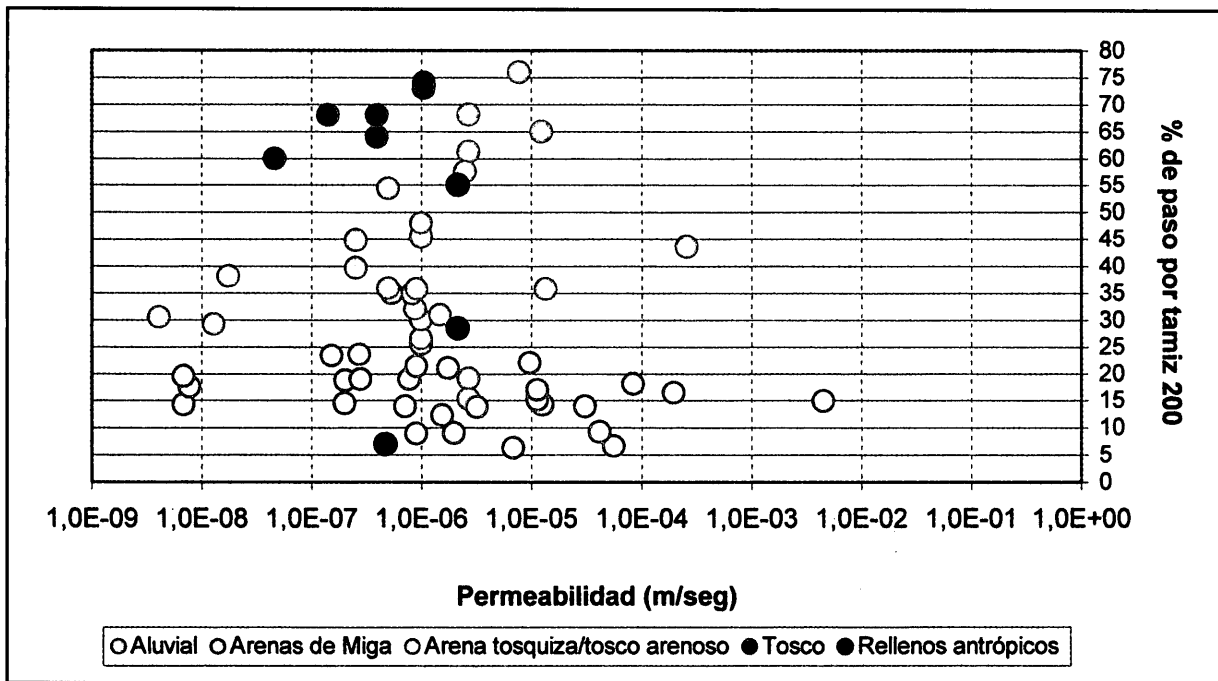


Figura 6.1. Permeabilidad de formaciones arcóscicas y tosquizas.

resultados es casi siempre problemática. También hay que contar con el remoldeo de las paredes del sondeo producido por la perforación, por lo que habría que recurrir, mas adecuadamente, a pruebas de bombeo.

Las circunstancias indicadas pueden advertirse en la fig. 6.1 donde se han recopilado numerosos ensayos tipo Lefranc realizados en diversas formaciones, desde los rellenos y arenas de miga hasta el tosco. En contra de lo que podía esperarse no parece existir correlación entre la permeabilidad y el tipo de suelo, expresado por el contenido en finos. La fórmula de Hazen indica para una arena con 10% de finos una permeabilidad de $k = 5,6 \times 10^{-5}$ m/s, existiendo resultados de ensayo bastante diferentes. La validez de esta fórmula en arenas con finos es objeto de discusión, existiendo investigaciones que parecen indicar (Boadu, 2000) que, por encima de un 11% de finos (y probablemente hasta un 40%) la permeabilidad prácticamente no varía. Para menos del 11% de finos la permeabilidad puede aumentar progresivamente hasta 3 órdenes de magnitud para el mismo suelo sin finos.

Con carácter general podría admitirse que, exceptuando las arenas de miga, los materiales tosquizos poseen una permeabilidad inferior a 10^{-4} cm/s, pero rara vez inferior a 10^{-6} cm/s. Permeabilidades inferiores a este valor son propias de las peñuelas y arcillas de alta plasticidad.

Por lo que respecta a las aguas subterráneas los mayores volúmenes se establecen, como es lógico, en los aluviales de los arroyos principales y sus vaguadas tributarias. A esta red de drenaje afluyen las aguas infiltradas en las zonas intermedias, las cuales penetran hasta encontrar los niveles mas impermeables.

En las formaciones superficiales, entre las que deben incluirse los rellenos antrópicos, predominan los niveles granulares de arenas de miga o arenas tosquizas, de permeabilidad media a alta. En ellos se establecen **aguas colgadas**, a veces en varios niveles separados por capas impermeables mas arcillosas. Es frecuente que las capas mas profundas muestren un cierto artesianismo, que puede llegar a la altura piezométrica de la capa mas superficial, denotando una alimentación común. Cuando el depósito granular potente que alimenta dichas capas queda muy distante éstas pierden carga hasta quedar casi secas o con un flujo que solo ocupa parte del espesor permeable.

En las series de aguas colgadas es frecuente la comunicación vertical entre ellas o la descarga de un nivel hacia el inferior cuando desaparece la base impermeable que sustenta al primero.

En las proximidades de los cauces aluviales con flujo permanente es frecuente la alimentación hacia los terrenos encajantes, siendo normalmente mas altos los niveles en la vaguada que en el entorno.

En las formaciones prácticamente impermeables de toscos y peñuelas se encuentran con cierta frecuencia intercalaciones granulares, con características de acuícluso, que no siempre están cargadas de agua y que se drenan con bastante facilidad. Normalmente su carga artésiana no llega a la altura piezométrica de las capas colgadas superiores.

En las zonas del sureste en donde las formaciones arcillosas preconsolidadas afloran u ocupan una situación subsuperficial es frecuente que estén atravesadas por "lisos" o fracturas derivadas de acciones tectónicas, desecación, etc. lo cual les confiere una permeabilidad global muy superior a la de la ma-

ASIGNACIÓN DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS PARA LOS PROYECTOS DEL METROSUR (5-11-1999)

TIPO DE SUELO	PESO ESPECÍFICO APARENTE γ (t/m ³)	COHESIÓN c' (t/m ²)	ÁNGULO DE ROZAM. INTERNO ϕ' (°)	MÓDULO DE DEFORM. (Subsid.) E (t/m ²)	COEFIC. DE POISSON ν	COEFIC. DE BALASTO K (t/m ³)
Rellenos antrópicos	1,80	0,00	28	800-1000	0,35	2.000
Rellenos seleccionados,						
Compactados	2,10	2	34	10.000	0,28	8.000
Aluviales	2,00	0,00	32	1.000-1.500	0,32	5.000
Depósitos Arenosos de Rampa	2,00	0,0 - 0,5	34	3.000-6.000	0,30	8.000
Arenas de miga	2,00	0,5 - 1,0	35	5.500-7.500	0,30	12.000-20.000
Arenas tosquizas	2,05	1,0 - 1,5	33	8.000-10.000	0,30	15.000-20.000
Toscos arenosos	2,08	2,0 - 2,5	32,5	13.000	0,30	25.000-35.000
Toscos	2,10	3,0 - 4,0	30	15.000-18.000	0,30	30.000- 40.000
Toscos de alta Plasticidad	2,06	4,0 - 8,0	28	20.000	0,28	40.000
Peñuelas verdes y grises	2,00	5,0 - 6,0	28	20.000	0,28	35.000-50.000
Peñuelas verdes						
o grises con yesos	2,10	5,0 -8,0	30	25.000	0,27	40.000-55.000
Peñuelas reblandecidas						
con yesos (o redepositadas)	2,00	0 - 1	28	1.000	0,35	5.000
Arenas micáceas en Mioceno	2,10	0,5 - 1,0	34	5.000	0,30	10.000
Sepiolitas	1,60	2	28	30.000-50.000	0,28	20.000
Caliches, Niveles Litificados	2,20	15	32	60.000	0,25	80.000-100.000
Yesos	2,30	7,0 - 10,0	28	40.000	0,26	60.000

NOTAS.- Cuando aparecen dos valores el superior es para niveles profundos (> 10 m) o mas consolidados o cementados. Estos valores deben considerarse orientativos, pudiendo ser modificados si lo justifican los resultados de ensayo obtenidos en cada caso.

triz, llegando a acumularse volúmenes apreciables de aguas infiltradas las cuales pueden aportar caudales de filtración importantes a las eventuales excavaciones, pilotajes, túneles, etc. Evidentemente la decompresión causada por la excavación contribuye al aumento de la permeabilidad.

Los problemas se incrementan en los casos de peñuelas yesíferas o yesos ya que el flujo de agua viene acompañado de fenómenos de disolución y karstificación, así como de un debilitamiento de la estructura del terreno la cual se hace mucho mas floja y compresible.

Evidentemente los mayores problemas se producen en las excavaciones encajadas en los recubrimientos granulares, sobre todo los de edad cuaternaria. Son conocidos los problemas sufridos por obras subterráneas o excavaciones realizadas en el ámbito de los grandes arroyos (Castellana, Abroñigal, Meaques, Aluche, etc.) o vaguadas importantes, muchas

de ellas difuminadas por el tejido urbano (calle Génova, Almagro-Miguel Angel, Alto Extremadura, etc.)

Como es lógico el contenido en sales agresivas es mínimo en las arenas arcósicas pero aumenta considerablemente en el caso de las peñuelas y yesos. En el tosco varía según las zonas.

7. PARÁMETROS RECOMENDADOS

La variabilidad observada en los parámetros geotécnicos de los distintos suelos de Madrid genera cierta confusión cuando se comparan proyectos geotécnicos de varios consultores, con repercusiones en la economía o seguridad de las obras. Esto ha llevado a la Dirección de la Ampliación del Metro a establecer unos valores característicos o de diseño a considerar en todos sus proyectos. Tales valores se conside-

ran suficientemente conservadores como para excluir sorpresas y, por otro lado, resultan aceptables de acuerdo con la práctica tradicional. Por otra parte ya han sido contrastados satisfactoriamente en diversos tramos de Metro.

Se incluyen a continuación unas tablas de los parámetros de diseño últimamente propuestos y considerados en los proyectos del Metrosur para cuya elaboración se ha contado con la colaboración de C. Oteo. ■

REFERENCIAS

- Ayuntamiento de Madrid (1986): "Geología, geomorfología, hidrogeología y geotecnia de Madrid". Temas Urbanos. Ecología nº 10. 141 p.
- Cuéllar, V. (2000) : "Reconocimiento de campo: Ensayos geotécnicos in situ". Simp. *Geotecnia de las Infraestructuras del Transporte*. Barcelona, SEMSIG, Ponencia 1.1.
- De la Fuente, P. (1984): "Estudio de la deformabilidad de los suelos arcillosos de Madrid". CEDEX, C-11, Madrid. 170 p.
- De la Fuente, P. (1991) : "Determinación de propiedades de deformabilidad". Curso "Cimentar en Madrid". CEDEX, I, Madrid.
- Escario, V. (1985): "Síntesis geotécnica de los suelos de Madrid y su alfoz". MTTC, D.G. Infraestructuras del Transporte, 80 p.
- Escario, V., G^a González, J.M., Moya, J.F., Oteo, C.S. y Sagasetta, C. (1981): "Problemas geotécnicos en torno a la ampliación de la red del Metro de Madrid". *Revista de Obras Públicas*. Enero, 7-27.

- López-Camacho, B., Bascones, M. y de Bustamante, I. (1986): "El agua subterránea en Madrid". *Bol. Inform. y Estudios*. Servicio Geológico, MOPU, nº 46, Junio, 128 p.
- López Corral, A. (1972): "Sobre el colapso de las arenas de mi-ga de Madrid". Tesis Doctoral.
- Oteo, C.S. y Moya, J.F. (1979): "Evaluación de parámetros del suelo de Madrid con relación a la construcción de túneles". *Bol. Inf. Lab. Carreteras y Geotecnia*, CEDEX, nº 137, Enero-Febrero.
- Oteo, C.S. (1991): "El marco físico y su incidencia geotécnica". Curso "Cimentar en Madrid, CEDEX, I, Madrid.
- Rodríguez Ortiz, J.M. (1991): "Expansividad y colapso". Curso "Cimentar en Madrid". CEDEX, II, Madrid.
- Rodríguez Ortiz, J. M^a (1995): "Subsidencia y auscultación". *Jornadas sobre la Ampliación del Metro de Madrid*. Comunidad de Madrid y AETOS, 127-142.
- Uriel, S. (1995): "El Metro y los suelos de Madrid". *Jornadas sobre la Ampliación del Metro de Madrid*. Comunidad de Madrid y AETOS, 99-114.

Cotas INTERNACIONAL S.A.

ÁREAS DE ACTUACIÓN:

- Estudios y Proyectos
 - Infraestructuras Viaria
 - Ingeniería Geotécnica
 - Industria
 - Hidrología e Hidráulica
- Asistencia Técnica
- Control de Calidad



Consultoría y Asistencia para el Control de Calidad de las Obras de Construcción de la Infraestructura del Tramo 5 de Metrosur:

- Estación 2 de Fuenlabrada
- Estación 5 de Fuenlabrada

OFICINA CENTRAL

C/ Francisco Sancha, 10 - 28034 Madrid
Tel.: 91 729 00 66. Fax: 91 729 04 99
E-mail: cotas@cotasinternacional.es