

RESUMEN: Se presenta la caracterización del perfil estratigráfico y las propiedades mecánicas de los suelos aluviales que se encuentran a lo largo del Río Tunjuelo, específicamente en el sector que se extiende desde la avenida Boyacá hasta cerca de la desembocadura del Río en el Bogotá. Se hace un estudio del tipo de materiales y los diferentes estratos que se encuentran a lo largo de esta área del Río como consecuencia de la dinámica de los procesos de transporte y depositación del río mismos. Igualmente se hace una caracterización de las propiedades índice y de resistencia de los suelos del área basados en los resultados de exploración y ensayos de campo (SPT veletas de campo, penetrómetro, CPT, refracción sísmica y down hole)., Los resultados de todo estos ensayos permitió identificar los tipos de suelos en cada zona del área estudiada y las propiedades relevantes que determinan el comportamiento mecánico de estos suelos. Esta información es útil para la selección de parámetros y la evaluación de estabilidad de taludes de excavación que existen y/o que se tengan proyectados.

INTRODUCCIÓN

El río Tunjuelo nace en el Páramo de Sumapaz en la Laguna de Los Tunjos de Chisacá a una altura de 3700 msnm; el nombre de Tunjuelo es usado a partir de la unión de los ríos Lechoso (o Mugroso), Chisacá y Curubital (Embalse de La Regadera). Fluye en dirección sur – norte hasta llegar al sector de El Apogeo donde cambia su dirección hacia el oeste. Su longitud es de 73 km y el área total de la cuenca es de 390 km² hasta su desembocadura en el río Bogotá. Su caudal medio es de 4,2 m³/seg transportando anualmente 133 millones de metros cúbicos de agua (Loboguerrero Geología Ltda., 1998, en Bolaños & Forero, 2003, referencia 1.). Este río como sistema fluvial se divide, de manera idealizada en tres partes, ver Figura No 1, de acuerdo con consideraciones geomorfológicas, hidrológicas, hidráulicas y sedimentológicas, ordenadas hacia aguas abajo:

- La zona 1 es la zona de producción de agua y sedimentos.
- La zona 2 es de transporte de sedimento, en la que para un canal estable, la entrada de sedimentos puede ser igual a su salida.
- La zona 3 es el área de depositación. (Schumm, en Moreno, 1995 referencia 2).

Es obvio que estas tres divisiones pueden parecer artificiales, pues en todas las zonas los sedimentos son almacenados, erodados y transportados, pero en cada zona existe un proceso dominante. En este contexto, es conveniente asumir la Zona 1 productora de sedimentos en la cuenca montaña y la zona 2 de transferencia o transporte como la llanura aluvial. La zona 3 con claro predominio de depositación no existe en las condiciones actuales del río Tunjuelo (aunque en un momento de la

historia geológica existió un delta de desembocadura en la Laguna de Bogotá).

Son las características y las propiedades de los suelos que conforman el cauce del río Tunjuelo y las zonas aledañas a este, la consecuencia de estos procesos de transporte, depositación y formación de sedimentos en cada una de las zonas del Río. Más sin embargo aunque la naturaleza de los materiales es la misma, las propiedades geomecánicas de estos suelos varían considerablemente, ya que estos materiales se encuentran en diferentes estados por los mismos procesos anteriormente indicados y la gradación de los materiales es diferente de acuerdo con la zona del río en donde se encuentren.

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

En la cuenca alta del río Tunjuelo afloran principalmente rocas sedimentarias Cretácicas (Formación Guadalupe) y Terciarias (formaciones Guaduas, Cacho, Bogotá, Regadera y Usme). A su salida a la zona plana discurre por conos aluviales del Pleistoceno (Fm. Río Tunjuelito). Tanto la erosión de las rocas cretácicas y terciarias como la de los conos aluviales proveen una carga de sedimentos tamaño limo y arena. Una vez entra a la Sabana propiamente dicha, el río arrastra también sedimentos arcillosos lacustres y detríticos provenientes de las formaciones arcillosas, principalmente en suspensión.

Los aluviones de los ríos Tunjuelo y Bogotá han sido definidos en estudios recientes del Cuaternario de la Sabana de Bogotá como la Formación Chía, mientras que los depósitos lacustres de la primigenia Laguna de Bogotá han sido denominados tradicionalmente como la Formación Sabana.

Zonas del Río Tunjuelo

Zona de vertiente (Zona 1): El río Tunjuelo nace en el Páramo de Sumapaz, aproximadamente a 3.700 msnm y discurre por la vertiente occidental alta de la Cordillera Oriental Colombiana hasta su salida a la Sabana de Bogotá. En este trayecto, el río es un cauce recto o poco sinuoso, encajonado entre un valle relativamente amplio, heredado de la acción de antiguas lenguas glaciares que llegaban hasta la Sabana de Bogotá en las épocas glaciares más frías, con una cuenca de alta producción de sedimentos. Dicho exceso en la producción de sedimentos a ser transportados por el río se debió a la combinación de procesos endógenos (tectónica) y exógenos (glaciaciones y morfodinámica). En la actualidad parece haber un equilibrio que permite que el río no se encuentre incidiendo la Sabana ni depositando excesivamente.

En cuanto a la denudación, esta se haya íntimamente ligada a los procesos tectónicos activos que disminuyen los parámetros geomecánicos de macizos rocosos, las fuertes pendientes y detonadores relacionados con actividades antrópicas (extracción de materiales de construcción, apertura de vías de manera antitécnica, uso equivocado del suelo, entre otras).

La cuenca productora de sedimentos muestra además cubrimiento parcial por unidades litológicas susceptibles a la erosión y la remoción en masa, tales como las formaciones Chipaque, Guaduas, Bogotá y Usme. Por otra parte, la existencia de zonas sujetas a glaciación intensa en la totalidad de la fuente de producción de sedimentos hace que incluso las rocas resistentes (areniscas de la Fm. Guadalupe) hayan sido afectadas de manera muy fuerte por procesos de gelifración, que también disminuyen las características geomecánicas de macizos rocosos, permitiendo su remoción y transporte.

Es importante anotar que el río ha sido intervenido fuertemente por la construcción de obras humanas, tales como el embalse de La Regadera; con estas obras se modifican los perfiles de equilibrio de las corrientes y se alteran los procesos naturales de erosión – transporte – depositación de los cursos de agua.

Zona de transporte (Zona 2): El río Tunjuelo tiene una zona de transporte muy definida y pasa de ser un río de montaña a ser un cauce meándrico, prácticamente sin transición. No obstante lo anterior, los registros sedimentológicos muestran que hasta hace relativamente poco tiempo, el río tenía un abanico aluvial muy bien desarrollado, en que un predominio de carga gruesa (gravas y arenas) producida por los procesos glaciares, fue transportada y depositada por un río con patrón trezado formando los depósitos gruesos de la Formación Río Tunjelito. Es posible que parte de este abanico (o durante ciertos periodos de tiempo su totalidad) estuviera cubierto por las aguas de la Laguna de Bogotá, con lo cual habría existido un delta lagunar. Lo anterior se evidencia en algunas intercalaciones de material fino lacustre dentro de la secuencia de gravas o la presencia de intercalaciones de arcillas aluviales dentro de la secuencia predominantemente arenosa.

Al modificarse las condiciones climáticas con el inicio del actual periodo interglaciar, la Laguna de Bogotá se secó de manera progresiva (es de esperarse que en las zonas marginales, tal como la zona de la salida del río Tunjuelo, este proceso haya ocurrido primero) al tiempo que finalizaban los procesos glaciares de montaña en la zona de vertiente, con lo cual se modificaron de manera total las condiciones de carga sedimentaria y de pendiente del río a su paso por la Sabana, transformándose en lo que es actualmente: un canal de tipo meándrico.

Río tipo meándrico (Zona 2): Los depósitos cuaternarios que conforman la llanura son finos; arcillosos, limosos y en menor proporción arenosos o gravillosos. Son de colores grises con moteados pardos en las zonas no expuestas a la dinámica de los cauces y de colores grises en las zonas de depositación reciente. Para esta zona, la granulometría del material se ha hecho progresivamente mas fina. Se observaron depósitos variables entre arena gruesa (con algunas capas con guijos de máximo 5 mm) y arcillas limosas. En cuanto a las subunidades morfológicas asociadas de manera típica con este patrón de cauce se encuentran las siguientes:

- Llanura aluvial: Hace referencia a la llanura aluvial abierta localizada a considerable distancia de áreas de erosión como cordilleras,

serranías, altiplanicies, o bien a la llanura intermontana enmarcada por vertientes estables y escasamente erosionables, circunstancias que determinan una relación de carga de sedimentos inferior a la capacidad de transporte de la corriente.

El doble proceso de erosión-sedimentación, suele ser poco activo cuando el caudal y la carga de aluviones son escasos, en cambio, este alcanza su máxima eficiencia cuando el nivel de las aguas se aproxima a su tope, sin salirse del cauce. Es entonces cuando la meandrificación o sea el crecimiento, corte y abandono de meandros, junto con la formación de orillares adquiere su mejor expresión (Figura No 2).

- Orillares o barras de meandro: Geoformas cóncavo convexas, alargadas y curvadas, a modo de patrones de surcos y camellones de diversa amplitud y desnivel, que se forman en la orilla interna de los meandros mediante la depositación de sucesivas capas de aluviones gruesos (comparados con la carga normal de la corriente) sustraídos del lecho por un flujo lateral subsuperficial (Figura No 2). Después de un desborde, las áreas cóncavas de los orillares pueden quedar cubiertas por aguas estancadas, y es entonces cuando se depositan partículas tamaño limo y arcilla (Figura No 2). Lo anterior da como resultado lentes de material grueso interdigitados con arcillas y limos.
- Madreviejas o meandros abandonados: Comprenden tramos del lecho de un río correspondientes a una curva de meandro abierta o cerrada, cuyo corte y aislamiento ocurre cuando la corriente puede acortar su curso, incrementando localmente su pendiente y haciendo mas efectivo el transporte de sedimentos. El taponamiento de sus extremos es rápido y tiene lugar por la acumulación de sedimentos del propio lecho (Figura No 2).

AREA DE ESTUDIO

El trabajo que acá se presenta sólo hace referencia a las propiedades y características de los suelos de dos sectores particulares del Río Tunjuelo, localizados en la Zona 2, en donde se han realizado estudios geotécnicos para dos proyectos de la Empresa de Acueducto de Bogotá. En dirección aguas abajo estás dos áreas son:

- Área I: La primera área de estudio comprende el sector de la salida del río montañoso a la zona plana, prácticamente sin transición. Esto corresponde al corredor del cauce antiguo del río Tunjuelo, desde la Avenida Boyacá hasta el cruce con la quebrada La Chiguaza, aproximadamente una longitud de 6 km. Área que se ubica en el sector de las canteras de explotación, fuente principal de materiales granulares para la ciudad de Bogotá, esta explotación ha hecho que hoy día desaparezca del mapa las características meándricas del río en el área.
- Área II: La segunda área de estudio corresponde a un sector particular que se ubica en la llanura de divagación e inundación del río Tunjuelo, en inmediaciones a su desembocadura en el río Bogotá (Localidad de Bosa), localizado aproximadamente entre el Cementerio de El Apogeo y la desembocadura del río Tunjuelo en el río Bogotá. La llanura de divagación esta separada de la llanura no inundable (donde se ubicaba el casco urbano primigenio de Bosa) por un escarpe (barranco) de aproximadamente 7 metros de altura. Esta área presenta una longitud de estudio de 7 km aproximadamente.

Ambas áreas se localizan en la llamada Zona 2, llanura aluvial de transporte con erosión y sedimentación que caracterizan a un sistema fluvial, como lo es el Río Tunjuelo. El área II, se localiza agua abajo del área I, a una distancia aproximada dekm.

TIPOLOGÍA DE LOS SUELOS EN LAS AREAS DE ESTUDIO

Para poder entender la tipología de los materiales del perfil estratigráfico encontrado y la geometría de localización de dichos materiales, tanto en profundidad como longitudinalmente, a lo largo de cada una de las áreas de estudio, es necesario como primera medida caracterizar de manera general cada una de las áreas, basados en la geología y geomorfología. El ambiente en que se encuentran estas dos áreas de estudio, área 1 y 2, es del tipo fluvial, caracterizado por dos factores determinantes que son propios del Río Tunjuelo, zona 2, anteriormente descrita:

- La caracterización en la forma de depositación: cauce meándrico

- El proceso predominante en el río: zona de transporte y erosión (zona 2 de un sistema fluvial)

El primer factor determina la forma de depositación de los materiales en la zona de influencia del Río Tunjuelo, el cual obedece a un cauce meándrico. Es así como la depositación de los materiales en las áreas de estudio se hace de forma lateral en los meandros del río, y crea una zona de erosión en la parte exterior de la curva del meandro y barras o islas de material depositado en la parte interna de las curvas. A su vez estos meandros se van desplazando hacia el exterior, y forman a lado y lado del alineamiento del Río, zonas heterogéneas tanto en profundidad como en el espacio de depósitos de material erosionado y transportado por el agua. Los depósitos tienen forma lenticular de extensión limitada y espesores típicos.

El segundo factor, determina el proceso interno propio de los ríos, que predomina tanto en el área I como en el área II. Estas áreas se extienden por donde predomina principalmente el transporte de sedimentos. Los materiales transportados corresponden a materiales erodados en zonas de aguas arriba y/o materiales transportados de esta misma zona de transporte, por el mismo carácter meándrico del río. El agua impulsada por la gravedad en forma de corrientes fluviales, es el agente de transporte y depositación de los materiales. El trabajo de las corrientes consta de tres actividades: erodar, transportar y sedimentar. De esta forma los materiales sólidos dentro de una corriente son transportados principalmente por el proceso de arrastre y suspensión.

El arrastre transporta materiales de diferente tamaño en función de la energía del flujo que depende de la velocidad y ésta a su vez de la pendiente. Por lo tanto los tamaños de materiales que se pueden encontrar en una zona, están limitados por la máxima energía que del Río en ella, lo que hace que la gradación de los materiales esté claramente acotada. El proceso de depositación de materiales en suspensión, se lleva a cabo en las zonas de baja energía, principalmente para materiales finos (limos y arcillas), por gravedad y básicamente en zonas estancas o de flujo lento. Es así como en la zona montañosa del Río, área I, donde la energía de depositación es mayor, y se refiere a los materiales gruesos. Posteriormente al ir llegando el cauce del Río a la llanura, donde disminuye la pendiente

longitudinal, área II-Tramo 1, el tamaño de los depósitos disminuye; en la parte en donde el flujo del Río se hace lento y casi estanco cerca de su desembocadura (pendiente casi plana), área II-Tramo 2, los materiales depositados son básicamente materiales en suspensión, que corresponden a materiales finos que se depositan por gravedad principalmente.

Teniendo en cuenta los factores anteriormente nombrados, junto con la variación de la energía de depositación hacia aguas abajo del Río Tunjuelo, hacen que el área I de estudio, ubicada aguas arriba del área II, se localice en la zona de montaña del Río. Mientras que el área II de estudio se localice en un ambiente de llanura de divagación del Río Tunjuelo los primeros kilómetros hacia aguas abajo (tramo 1) y en una zona de inundación en la parte final del área influenciada por el Río Bogotá (tramo 2). Estas condiciones definen los tipos de suelos que se encuentran en cada área de estudio:

Área I: Esta área de estudio está constituida básicamente por los depósitos aluviales que conforman el Cono de Tunjuelo (Qct). Esta formación de Conos del Tunjuelo, se determina por depósitos detríticos compuestos por gravas, cantos y bloques redondeados a suredondados que van desde 1" hasta 1 m de diámetro, depósitos envueltos por una matriz areno-limosa o areno-arcillosa. Estos depósitos son provenientes de varios conos aluviales siendo el mayor aporte el mismo río Tunjuelo, junto con aportes de origen glaciario, que se entrelazan y afloran en el valle del río. El espesor de estos depósitos de conos aluviales, puede alcanzar hasta una profundidad de 100 m y se distribuyen en niveles sub-horizontales, que han sido objeto de explotación para agregados de concreto. Dentro de estos depósitos detríticos de los conos aluviales se incluyen igualmente los depósitos de materiales que transporta el mismo Río Tunjuelo dentro de su cauce. La composición de estos materiales transportados depende estrechamente de la energía y dinámica del río, es así como los suelos de la zona de aguas arriba, presentan un porcentaje mayor de material con tamaño grueso (gravas gruesas), mientras que en la zona de aguas abajo, este material grueso se encuentra en menor proporción dentro de la masa de suelo y prevalecen las gravas finas. Más sin embargo independientemente del tamaño de las gravas,

todas tienen en común a lo largo del área de estudio, que nunca se encuentran en contacto entre sí, sino que dichas partículas de gravas flotan en una matriz de suelos finos que las envuelve, matriz areno-limosa en unos casos y en otro areno-arcillosa. De otra parte, antes de la explotación minera en la zona, hace aproximadamente unos cincuenta años, el área se encontraba cubierta por una unidad geológica en superficie, la Formación Chía. Esta se encuentra conformada por sedimentos fluviales de grano fino, principalmente arcillas y limos. Este material cubre a los materiales del Cono del Tunjuelo de manera discordante. El espesor máximo que se encuentra en la zona es de 5 m. Es así como en algunas zonas no intervenidas dentro de la explotación de las canteras, aún se encuentra un estrato superficial de limos. Por otro lado, el hecho de que en la zona se haya llevado acabo la explotación minera del material de gravas, hace que se presenten a lo largo de las zonas aledañas al cauce antiguas canteras ya rellenas. Los rellenos de estas canteras son rellenos de carácter antrópico desarrollados dentro de las mismas labores de explotación. Estos rellenos que se presentan a todo lo largo de la zona del proyecto, presentan diferentes tipos de materiales, relleno de limos y arenas provenientes del lavado y la explotación conformados por la matriz que envuelve las gravas de la zona, rellenos de gravas igualmente del estéril de la explotación conformado por gravas finas mezclado con material de limos y/o arenas limosas y rellenos tipo botadero conformado por material heterogéneo externo a la zona de explotación.

Area II: En esta área confluye con la llanura de origen lacustre, que corresponde a la llanura formada por la desecación de la Laguna de Bogotá. Formación base por donde los ríos Tunjuelo y Bogotá, hicieron incisión sobre estos materiales creando contacto entre la llanura aluvial de dichos ríos y la llanura lacustre de la Laguna de Bogotá. En estos ambientes los depósitos están formados por depósitos de materiales finos, arenas, limos y arcillas, que se hacen más finos en la medida que progresa el proyecto en dirección al Río Bogotá. Es así como en la zona alta del área, en la salida del río a la zona plana donde todavía discurren los conos aluviales de la Formación Tunjuelo, los suelos que predominan son arenas finas a muy finas, con

algunos horizontes delgados (espesor menor de 50 cm) con predominio de arenas muy gruesas, hasta gravas muy finas (gravilla), tamaño de grano siempre menor de 1 cm. Más hacia agua abajo se localizan los depósitos lacustres de la Laguna de Bogotá, los suelos que predominan en esta zona son limos arcillosos, con variaciones a limos arenosos.

Adicionalmente en la parte alta del área de estudio, se encuentran unos rellenos antrópicos. Rellenos heterogéneos realizados de manera desordenada y sin ninguna especificación técnica con arcillas provenientes de cortes o excavaciones en las zonas de sabana, mezclados con residuos de construcción, basuras, etc. Estos rellenos se encuentran superficialmente cubriendo las formaciones Chía y Río Tunjuelo

Los aluviones del Río Tunjuelo y Bogotá, que se encuentran en la parte media y baja del área, forman lo que se denomina la Formación Chía. En el área de estudio se observa una secuencia aluvial predominantemente areno-limosa, cubierta por rellenos antrópicos o por arcillas limosas posiblemente provenientes de desbordes del Río Tunjuelo. El espesor de los lentes o capas de arena varía entre pocos centímetros y máximo 5 metros y suprayace a arcillas. Estas arcillas pueden gradar lateral y verticalmente a arenas finas.

Esta tipología de los suelos en las dos áreas de estudio en donde difiere básicamente la gradación de los materiales de más gruesos en la zona de aguas arriba hacia más finos en la zona de aguas abajo, influyó la metodología de exploración y ensayos geotécnicos en cada una de las áreas.

ESTRATIGRAFÍA DE LOS SUELOS

AREA I: De acuerdo con toda la información obtenida en las perforaciones, los resultados de las líneas sísmicas, la geología y geomorfología del área junto con lo que se evidenció en campo, en el área I el perfil estratigráfico general que se tiene es:

1) Estrato 1: Rellenos heterogéneos: son materiales estériles sobrantes de la explotación del material de gravas conformados por limos, arenas y gravas mal seleccionadas. Los espesores de estos materiales son muy variables, desde unos pocos centímetros hasta más de 20 m de espesor en aquellas áreas de rellenos de canteras de explotación antiguas. Las velocidades de

propagación de onda característica de estos materiales se encuentran entre 200 m/s y 380 m/s. De encontrarse en estos rellenos materiales de escombros esta velocidad puede aumentar hasta 480 m/s.

2) Estrato 2: Limos superficiales: En forma general se puede observar de manera discontinua a todo lo largo del proyecto la presencia de una capa superficial de limos. Capa que muchas veces se encuentra cubierta por el material de rellenos o directamente se encuentra en la superficie del terreno. El espesor de este material de limos varía entre unos pocos centímetros hasta 3 m de espesor. Este material de limos no se encuentra en condición limpia, la mayoría de las veces se encuentra mezclado con arenas y en algunos casos además contiene unas pocas gravas finas. Este estrato se encuentra en contacto en profundidad con el estrato de gravas. Este contacto entre el estrato de limos (2) y el subsiguiente estrato de gravas (3) no se pudo de determinar con las líneas de refracción sísmica.

3) Estrato 3: Gravas en matriz areno-limosa con lentes de materiales finos: Este es el primer paquete de gravas que se encuentra en profundidad, donde prevalece una matriz limo-arenosa o areno-limosa que envuelve las partículas de gravas. Se observan en este paquete unos lentes de arenas, limos o arcillas limosas en algunos casos, de manera intercalada sin ningún patrón establecido a todo lo largo del proyecto. El espesor de este estrato de gravas es variable entre 5 m a 15 m de manera muy general. La velocidad de propagación de onda al corte de estos dos estratos unidos, estrato 2 y 3, se encuentra entre 450 m/s y 850 m/s. El rango amplio de variación se da básicamente por el tamaño y el porcentaje existente de las partículas de gravas en toda la masa de suelo y la compacidad que tenga dicho estrato a todo lo largo del proyecto.

4) Estrato 4: Gravas en matriz areno-limosa. En profundidad siguen apareciendo las gravas hasta profundidades de 40 m de acuerdo con lo observado en las zonas de explotación. Los estratos de gravas más profundos poseen velocidades de propagación de onda mayores en comparación al estrato de gravas superficial, valores que se encuentran entre 1200 m/s y 2000 m/s. La razón de esto, es que estos estratos profundos se encuentran más compactos y/o que posiblemente puede que partículas de gravas sean

de mayor tamaño en comparación al estrato anterior (estrato 3).

De esta forma se identifican de manera general tres tipo de estratos en la zona del proyecto: estrato de rellenos, estrato de limos arenosos, estrato de gravas en matriz de finos. La configuración geométrica de estos estratos varía espacialmente, ya que la topografía de la zona es muy heterogénea debido a los procesos antrópicos de explotación de los sectores aledaños al río. Además se debe tener e cuenta que dichos procesos han ido igualmente variando en el tiempo y que han generado el movimiento forzado de cauce del río de manera aleatoria a todo lo largo de la zona. Independientemente de esta variación espacial tanto a lo largo y ancho de la zona del proyecto, lo que se puede concluir es que los suelos característicos que conforman la zona son un material aluvial (gravas y cantos en matriz areno-limosa) que conforma el valle del Río Tunjuelo.

AREA II: En cuanto al perfil estratigráfico de suelos en el área II de estudio, se tiene que los materiales que se encuentran son propios de una llanura aluvial con baja energía donde prevalecen materiales de tamaños menor a un 1 cm., desde gravas finas en muy baja proporción hasta arcillas, pasando por arenas y limos, en donde no existe un patrón uniforme en la distribución en profundidad de los estratos de suelo, en las perforaciones realizadas.

Existe una variabilidad marcada en distancia en la distribución de los materiales. Debido a la erosión, transporte y depositación de materiales generados por el agua del río, los materiales encontrados en los estratos de suelo no se encuentran de manera limpia, sino en la mayoría de los casos son mezclas de suelos, como arenas limosas, limos arcillosos con algo de arena, etc. La granulometría de los suelos es progresivamente mas fina, desde la parte alta hacia aguas abajo. Empezando con arenas gruesas y algunas gravas de tamaño pequeño hasta llegar cerca de la desembocadura del río Tunjuelo en el río Bogotá con materiales netamente arcillosos. Existen unos rellenos antrópicos superficiales que cubren los suelos naturales, a lo largo del área. Se trata de rellenos heterogéneos conformados por materiales sobrantes de excavación, basura y/o escombros.

La variabilidad de los materiales en esta área II, es mucho más significativa que en el área I anteriormente descrita. Es así como de acuerdo con la gradación general de los suelos que se encuentran en el perfil estratigráfico a lo largo de esta área de estudio, esta área II puede dividirse en dos tramos:

- TRAMO 1: Desde el inicio del área hasta aproximadamente el km4+000. Se caracteriza por tener materiales con gradación predominante entre gravas finas, arenas gruesas, medias y finas. Estos suelos se presentan en su gran mayoría en matriz de materiales finos, limos y arcillas, con porcentajes de finos que varían entre el 10% al 60%. Existen algunos estratos de espesor pequeño con arenas limpias en la zona. En el perfil estratigráfico del tramo 1, se hallan básicamente arenas limosas (SM) en un 40% de toda el área, arcillas de baja plasticidad (arcillas arenosas, arcillas limosas) en un 30% aproximadamente y el resto de estratos (arcillas de alta plasticidad, limos, limos orgánicos, arenas arcillosas, etc), suman el restante 30% de la superficie.

- TRAMO 2: Comprende entre el km4+000 hasta el final del área, en el km7+000. Se destaca por involucrar materiales de gradación más fina que el anterior tramo. Prevalcen los suelos finos, entre limos y arcillas, en especial los primeros. En el perfil estratigráfico del tramo 2, se encuentran básicamente limos de alta plasticidad, limos arcillosos (MH), en un 75% de toda el área. Arcillas de alta plasticidad (arcillas limosas y arcillas) se presentan en un 14% del área aproximadamente y el resto de estratos de suelos como son arcillas y limos de baja plasticidad suman el restante 11% del área.

En la figura No 4, se observa el perfil de velocidades en cada uno de los tramos del área II de estudio.

CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS

ÁREA I: Los suelos que caracterizan esta área son gravas y cantos de diferentes tamaños en matriz areno-limosa principalmente. Lo que se observa es que las partículas de gravas flotan en la matriz de suelos finos y dichas gravas nunca se encuentran en contacto entre sí. De ensayos granulométricos, se pudo determinar que los porcentajes de partículas con tamaños mayores a 2

cm. se encuentran entre el 30% y el 60% de la masa total. Ver Figura No 5

Los trabajos de Winter y Suhardi (1993), referencia 3, determinaron que si el porcentaje de las partículas de gravas de gran tamaño (mayores a 2 cm. de diámetro) es menor al 50% o al 60% de la masa total, las propiedades de los suelos que conforman la matriz son las que controlan las propiedades de todo este estrato de gravas. Por lo tanto el comportamiento de estos estratos de gravas en el área I está dado por las propiedades de la matriz de finos. De esta manera los ensayos realizados se hicieron sobre muestras de materiales finos que envuelven los materiales gruesos. De las curvas granulométricas se observa que los estratos de gravas a todo lo largo del área de estudio tienen una gradación similar propia de un suelo granular bien gradado (well graded), es decir suelos que tienen un rango amplio de tamaño de partículas, que contiene distribuciones aproximadamente iguales entre los materiales gruesos y los finos. El porcentaje de materiales finos (diámetro menor a 0.06 mm) se encuentra entre el 10% y 30% con respecto al peso total de la muestra. El porcentaje de partículas de gran tamaño (mayores a 20 mm) entre el 30% y el 60 %.

De los resultados de los ensayos de laboratorio se obtuvo que la matriz fina de estos estratos de gravas es una mezcla de arenas y limos o arenas y arcillas con porcentajes de los dos materiales casi igual (50% arenas y 50% finos), donde el comportamiento de esta matriz es muy similar en todos los casos. La matriz arenosa, consiste en arenas limosas o arcillosas que se clasifican como SM y/o SC, con humedades menores al 20%, índices de plasticidad bajos entre el 4% y 13%, lo que permiten observar que estas arenas en todos los casos no se encuentran limpias sino mezcladas con materiales bien sea limosos o arcillosos, donde el porcentaje de limos o arcillas se encuentra entre el 10% y el 40% aproximadamente. La matriz limosa o arcillosa consisten en arcillas o limos de baja plasticidad que no se presentan limpias sino mezcladas con arenas, el porcentaje de arenas medido está entre el 20% y 50%. Razón por la cual los índices de plasticidad son medios a bajos, entre el 25% y el 4%. La humedad de estos materiales varía entre el 2% al 25% La mayoría de los casos prevalece el contenido de arenas por lo tanto se considera que

esta matriz fina tiene un comportamiento típico propio de un material granular.

Se debe hacer la anotación que debido a las propiedades de los suelos, en su mayoría granulares con contenidos de gravas importantes, no fue posible por medio de las perforaciones caracterizar de manera continua en profundidad los materiales, ni tampoco fue posible la toma de muestras, contrario a la caracterización de los materiales que se presentan a continuación en el área II.

AREA II: Los suelos de esta área son propios de depósitos aluviales con diferentes tipos de materiales a todo lo largo y profundo del área estudiada. Como se indicó esta área de estudio se puede dividir en dos tramos, cada tramo presenta unos suelos característicos que se describen de manera resumida a continuación, cuyos parámetros se indican igualmente en las figuras.

TRAMO 1: El tipo de materiales que se encuentran en este tramo va desde arenas gruesas hasta arcillas, pasando por arenas finas y limos. La mayoría de las arenas contiene un porcentaje mayor del 15% de finos, por lo tanto su comportamiento está regido en su mayor parte por el material cohesivo, ver Figura No 8, razón por la cual, se pudieron hacer mediciones de penetrómetro en estos materiales. Existen unos pocos estratos de arenas limpias en el perfil estratigráfico que se distribuyen de manera heterogénea a lo largo y profundo del perfil de suelos. Existen en ciertos estratos de arenas distribuidos a lo largo del perfil, un porcentaje de grava que casi siempre es menor al 20%. Estas gravas son finas con diámetro menor a 1cm. Las arcillas al igual que las arenas nunca se encuentran limpias, siempre se encuentran mezclada con limos o arenas. Los valores de humedad en la mayoría de los materiales que aparecen a lo largo y profundo de este tramo 1, se encuentran en un rango entre el 20% y 40%, ver Figura No 6. Materiales que poseen valores de humedad mayores al 40%, son básicamente los estratos de arcillas de alta plasticidad (CH) y los limos de alta plasticidad (MH, MH-OH). Los valores menores de humedad se presentan en los estratos de suelos arenosos localizados cerca de la superficie del terreno. En cuanto al índice de plasticidad de las arcillas encontradas, por el hecho de mezclarse con materiales arenosos o

limosos, su plasticidad se encuentra entre baja y media. Solo unos pocos estratos de arcilla y limos exponen índices de plasticidad mayores al 40%, ver Figura No 7. La mayoría de los materiales poseen valores de peso unitarios totales entre 18 KN/m³ y 21 KN/m³, ver Figura No 9. Existen unos pocos limos y arenas limosas con valores menores a 18 KN/m³. Los valores de gravedad específica de los materiales hallados a lo largo y profundo del perfil de suelos se encuentran entre 2.5 y 2.7, de manera general, indicativos de minerales silíceos predominantes en su composición.

TRAMO 2: El perfil estratigráfico del tramo 2, es propio de depósitos aluviales de transición al depósito lacustre de la Sabana. Al contrario de la heterogeneidad de los materiales presentes en el Tramo 1, en este tramo, los materiales en su mayoría son finos (limos y arcillas) y prevalece la presencia de limos de alta plasticidad (MH), ver Figura No 12. Los tipos de materiales que se encuentran en este tramo son limos de alta plasticidad básicamente y arcillas de alta y baja plasticidad. En los primeros metros de longitud de este tramo 2, en la transición con el Tramo 1, se encuentran algunos limos con presencia de arenas. El comportamiento de este segundo tramo está controlado por el carácter cohesivo de los materiales. Las arcillas al igual que los limos en la mayoría de los casos nunca se encuentran limpias siempre se encuentran mezclados entre sí, estos dos materiales (limos arcillosos o arcillas limosas). La humedad de los suelos aumenta con la profundidad, ver Figura No 10. Los materiales arcillosos y limosos con menor plasticidad tienen valores de humedad entre el 20% y 50%. Por el contrario los materiales con mayor plasticidad, presentes en el perfil tiene valores de humedad mayores, entre el 50% y 110%. En cuanto al índice de plasticidad de los limos y arcillas de este tramo, presenta una tendencia a aumentar con la profundidad, ver Figura No 11. La mayoría de los materiales que se presentan en el perfil tienen valores de índice de plasticidad mayores al 40%. Es decir presentan plasticidades altas. La mayoría de los materiales que se encuentran en este tramo 2, poseen valores de peso unitarios totales menores a los de los materiales que se encontraron en el tramo 1. Los valores de peso unitario total en los suelos existentes en este tramo 2, se encuentran entre 14 KN/m³ y 17 KN/m³, ver

Figura No 13. Existen unas pocas arcillas de baja plasticidad que presentan valores alrededor de 19 KN/m³. Los valores de gravedad específica de los materiales encontrados a lo largo y profundo del perfil de suelos se encuentran entre 2.45 y 2.6. De manera general son valores bajos indicativos de alto contenido de materia orgánica y posiblemente minerales asociados en su origen con cenizas volcánicas que son típicos de los depósitos lacustres de la Sabana. Es decir estos suelos del tramo 2, presentan gravedades específicas menores, comparadas con las de los suelos hallados en el Tramo 1.

PROPIEDADES DE RESISTENCIA

AREA I: Más que determinar los valores del ángulo de fricción en este tipo de materiales granulares como son las gravas y/o las arenas limosas o arcillosas, es necesario estudiar el comportamiento mecánico de estos materiales granulares propios de esta área. Teniendo en cuenta como se indicó anteriormente, que el porcentaje de partículas con tamaños mayores a 2 cm. en los estratos de gravas se encuentra entre el 30% y el 60% de la masa total y basados en los trabajos de Winter y Suhardi, se concluye que la resistencia de estos estratos de gravas está dado por las propiedades de la matriz de finos. Es esta la razón por la cual los ensayos de corte directo realizados se hicieron sobre la matriz de finos que envuelve al estrato de gravas. Los resultados de los ensayos de corte directo realizados para varias muestras de suelos que conforman la matriz, se indican en la Figura No 14. En esta figura se observa las diferentes envolventes de resistencia de estos materiales. Se debe tener en cuenta que estas muestras son armadas en laboratorio, es decir no son muestras inalteradas.

Lo que indican los resultados es que se tienen varias envolventes de falla para este tipo de materiales que conforman la matriz, unas envolventes se toman a partir de los valores picos de resistencia y otras envolventes se toman a partir de los valores de resistencia en estado crítico. Para comprender la variabilidad de los resultados de los ensayos de resistencia obtenidos en materiales similares, arenas limosas o limos arenosos, se debe tener en cuenta que la resistencia de los suelos granulares (arenas o

gravas) esta relacionada con la facilidad que tienen las partículas de suelo de moverse en la dirección general del plano de falla. Si los movimientos relativos entre las partículas de suelo fueran solamente en esta dirección, como si las partículas de suelo rodaran sobre una superficie plana, se tiene que la resistencia de los suelos estaría determinada por la fricción de deslizamiento entre partículas, ϕ_u . Los valores típicos de esta fricción para suelos granulares se encuentran entre 25° y 35° de acuerdo con los minerales que conforman a dichos suelos. Esta resistencia se genera simplemente por el contacto entre partículas. Pero además se debe tener en cuenta que durante una falla del suelo, las partículas que conforma el suelo granular, no solo se mueven en la dirección del plano de corte, sino en otras direcciones. Es así como en un suelo granular denso, las partículas de suelos adyacentes se empujan unas con otras y se enciman unas sobre otras, lo que se ve reflejado en la expansión o la dilación de la masa de suelo. Una dilatación de la masa de suelo no solo es indicativo de un suelo denso, sino de que las partículas de suelo adyacentes se enciman unas sobre otras, para poderse movilizar en la dirección del plano de corte. Estas partículas empujándose unas con otras, generan una resistencia o fricción adicional, esta resistencia adicional se conoce con el nombre de “interlocking” o resistencia geométrica (ϕ_g). En la medida que aumenta la presión de confinamiento en el suelo con la profundidad, el empuje entre partículas adyacentes y el hecho que se encimen unas sobre otras se hace cada vez más difícil. En este caso de altas presiones de confinamiento, el desplazamiento relativo entre partículas se da mas por el rompimiento de las mismas y de esta forma los movimientos entre partículas ocurren principalmente en la dirección de la falla y la resistencia geométrica, en este caso disminuye. La disminución de la resistencia cuando aumenta la presión de confinamiento, debido al hecho de que la componente de la resistencia geométrica disminuye, hace que la envolvente de resistencia sea una curva tal como se indica en la Figura No 15.

El ángulo de fricción, ϕ , definido como la pendiente de la envolvente de resistencia, consiste en la suma de dos componentes de resistencia, la componente del contacto entre partículas, ϕ_u y la

componente de la resistencia geométrica □g. La resistencia geométrica es producida básicamente por la dilatación del suelo, en donde las partículas adyacentes se enciman unas sobre otras, por el empuje y el acomodamiento entre partículas.

De esta forma se tiene que la resistencia de los suelos granulares tiene una componente que depende directamente de la densidad relativa de los suelos. Si la relación de vacíos o porosidad de un suelo aumenta, la componente de la resistencia geométrica disminuye por el hecho de que el fenómeno de la dilatación disminuye. Es así como se puede ver en la Figura No 16, que entre mayor sea la porosidad es decir entre menos denso sea un suelo granular, la resistencia disminuye. (□ disminuye).

Por lo tanto para hablar de la resistencia de un suelo granular no se puede referenciar a un único valor, ya que este depende de la porosidad que tenga dicho suelo, tal como se puede resumir en la Figura No 16. Es tal razón por lo que en los ensayos de corte directo realizados para los suelos encontrados en la llanura aluvial del río Tunjuelo del área I de estudio, sobre diferentes muestras de un mismo tipo de suelos (arenas limosas o limos arenosos) se obtuvieron diferentes valores de resistencia. En cada uno de los ensayos se obtuvo la porosidad para las muestras ensayadas y se graficó este valor contra el valor de la resistencia obtenida en el corte directo, tal como se indica en la Figura No 17. De esta forma se puede obtener como disminuye el valor del ángulo de fricción solo por el cambio de la densidad o la porosidad de estos suelos. Es así como se concluye que si los suelos granulares de la zona están densos van a tener resistencias mayores a que si estos están sueltos, y cualquier proceso que produzca cambio de densidad bien sea deformación que induce dilatación, o por erosión interna generan disminución en la resistencia.

Por otra parte en estos estratos de gravas, se debe tener en cuenta que la resistencia a su vez puede aumentar en comparación a los valores obtenidos de resistencia de la matriz, por el hecho de que la resistencia geométrica aumenta, pues el fenómeno de dilatación (partículas adyacentes pasando unas encima de otras) es más significativo en partículas de mayor tamaño.

De esta forma se concluye que el comportamiento mecánico de estos estratos de gravas que

caracterizan el área I de estudio, están regidas por el comportamiento de un suelo granular.

AREA II: En esta área II, contrario al área I, el comportamiento mecánico de los suelos está regido más por el comportamiento de los suelos finos, limos y arcillas, más que el de los suelos granulares (arenas y gravas), ya que los mismos ensayos realizados en campo y laboratorio así lo demuestran. En esta área se puede medir en profundidad y a todo lo largo del área el valor de la resistencia (cu) incluyendo los suelos arenosos, por medio del penetrómetro, lo que confirma la presencia importante de un porcentaje de finos en estos materiales granulares y hace presumir que el comportamiento de éstos últimos está regido por el material cohesivo que contiene. A continuación se indican los diferentes mediciones tomadas de resistencia de los suelos tanto en el tramo 1 como en el tramo 2 de esta área.

TRAMO 1: Con respecto a las propiedades de resistencia de los materiales del tramo 1, localizados en el área II, donde se presentan tanto materiales finos, limos y arcillas, como materiales granulares, arenas se tiene que en estos suelos ya se pueden tomar mediciones de campo de la resistencia no drenada, ya que el tamaño de los materiales es pequeño comparado con los materiales tipo grava del área I. Los valores de resistencia al corte no drenada (cu) obtenidos con el ensayo de veleta de campo, en general son menores a los obtenidos con el penetrómetro. Este último ensayo da como resultado un rango de valores más amplio que el extraído de la veleta de campo. Esto se debe a que los dos ensayos obedecen a formas diferentes de fallar el suelo y medir su resistencia, motivo por el cual, es de esperarse que haya una diferencia sistemática en los resultados de los dos ensayos. En general los valores de resistencia al corte (cu) medidos con la veleta de campo a todo lo largo y profundo del perfil estratigráfico de este tramo 1, se encuentran entre 20 KPa y 70 KPa. Este ensayo se realizó en los suelos arcillosos y limosos existentes en el perfil de la zona. En general los valores de resistencia al corte (cu) medidos con penetrómetro a todo lo largo y profundo del perfil estratigráfico de este tramo 1, varían entre 15 KPa y 230 KPa. Este ensayo se pudo realizar tanto en los suelos arcillosos como en los arenosos. De otro lado los valores de N obtenidos por medio del ensayo de SPT, se pudieron medir tanto en suelos arenosos como

arcillosos. De esta forma se pudo igualmente corroborar que los materiales arcillosos tienen porcentajes de materiales granulares lo que permite obtener resistencias importantes de SPT. Se concluye entonces, que en general todos los materiales que se presentan a lo largo y profundo de este perfil estratigráfico, se encuentran siempre mezclados. Los valores de N obtenidos con el ensayo de SPT sobre los materiales granulares de la zona varían entre 2 y 50. Los valores de N provenientes del ensayo de SPT sobre los materiales cohesivos de la zona oscilan entre 2 y 30, lo que muestra que el comportamiento de ambos tipos de suelos es similar, ya que contienen una mezcla de materiales. La resistencia por punta medida en el sitio donde se hicieron los ensayos de cono, sugiere que los materiales tienen resistencia que varía entre 1000 y 14000 kPa. Las envolventes de falla de los diferentes tipos de materiales encontrados a todo lo largo y profundo del tramo 1, muestran el rango de valores de resistencia donde se pueden encontrar los suelos de esta zona. Ver Figura No 21.

TRAMO II: Con respecto a las propiedades de resistencia de los materiales que se encuentran en este tramo 2 del área II se caracteriza por el hecho de que esta zona prevalecen suelos finos, limos y arcillas. Es esta la razón por la cual los valores de N procedentes del ensayo de SPT, sólo se pudieron medir en los suelos superficiales, 2 m de profundidad, en donde se encuentran suelos duros afectados por los cambios del nivel freático y desecación. En el resto de los materiales del perfil que se extiende en profundidad no se obtuvieron valores de N, por las características blandas de estos materiales limosos y arcillosos, ver Figura No 23. Los valores de resistencia al corte no drenada (C_u) obtenidos con el ensayo de veleta de campo, en general son menores a los obtenidos con el ensayo de penetrómetro, como ya se dijo anteriormente por la forma como se lleva a la falla al suelo en cada uno de los casos. En general los valores de resistencia al corte (C_u) medidos con la veleta de campo a todo lo largo y profundo del perfil estratigráfico de este tramo 2, se encuentran entre 15 kPa y 30 kPa. Este ensayo se realizó a todo lo largo y profundo del perfil de suelos, puesto que los materiales de la zona son suelos arcillosos y limosos. En general los valores de resistencia al corte (C_u) medidos con penetrómetro a todo lo largo y profundo del perfil

estratigráfico de este tramo 2, se encuentran entre 25 kPa y 220 kPa. De otro lado se observa que en los primeros 10 m de profundidad, los valores de resistencia son mayores y con valores variables. Por el contrario debajo de los 10 m de profundidad, los valores de la resistencia son más uniforme y menores, estos se encuentran entre 25 kPa y 70 kPa. Ver Figura No 22. La resistencia por punta medida en los ensayos de cono (CPT-2 y CPT-3), ver Figura No 24, indica que los materiales poseen una resistencia más o menos uniforme que varía entre 250 kPa y 1000 kPa. Localmente existen unos aumentos de la resistencia en pequeños estratos de suelos, que tienen un espesor menor a 1m.

Las envolventes de falla de los materiales cohesivos hallados a todo lo largo y profundo del tramo 2, se indican en la figura No 25. Los valores del ángulo de fricción de estos suelos cohesivos se encuentran entre 12° y 15° .

CONCLUSIONES

De manera general se puede concluir, que las características y propiedades mecánicas de los suelos aluviales del río Tunjuelo, son el resultado de los procesos de transporte y depositación que se presentan a lo largo del río. Los tipos de materiales que se encuentran en los suelos de las áreas de estudio y su distribución dentro de la masa total de suelo, son la consecuencia directa del comportamiento dinámico y de las unidades de depositación en el tiempo y el espacio del Río Tunjuelo. Este comportamiento de depositación y transporte determina varios factores:

- 1) La distribución de los materiales a lo largo del río, en la zona de influencia del mismo.
- 2) La distribución de los tipos de materiales en profundidad.
- 3) El estado (densidad) en que se encuentran estos materiales a lo largo del río.
- 4) El hecho de que cada uno de los tipos de suelos, gravas, arenas, limos y arcillas, presentes a lo largo del río no se encuentren limpios sino exista una mezcla de estos materiales.

Adicionalmente el cambio de energía de depositación que se presenta por causa de la disminución de la pendiente longitudinal del cauce del Río Tunjuelo hacia agua abajo, determina que exista una disminución progresiva de los tamaños en la granulometría de los materiales desde aguas arriba hacia agua abajo del mismo. Gradación que determina varios factores:

- 1) La forma y el tipo de ensayos como se debe realizar para la exploración de campo.
- 2) El tipo de ensayos de laboratorio que se pueden realizar sobre los diferentes materiales.
- 3) El tamaño de los depósitos de suelos que se encuentran a lo largo del río.
- 4) El tipo de suelos que se presentan en cada área del río, granulares o finos.

Todos los anteriores factores determinan los suelos presentes a lo largo del río y las propiedades geomecánicas de los mismos. Es así como en el área I de estudio, los materiales que

predominan son gruesos conformados por gravas envueltas en matriz areno limosa o arcillosa, donde el comportamiento mecánico de estos materiales está determinado por la matriz, predominantemente arenosa. Es así como las propiedades y el comportamiento de los suelos de esta área, es el característico de un suelo granular. Lo más relevante del comportamiento mecánico de los suelos granulares es que la resistencia de estos suelos está determinada por el estado del material, ya que la resistencia es función de la densidad del mismo. La densidad a su vez cambia de manera muy importante si el suelo se ve sometido a esfuerzos cortantes y/o se producen deformaciones.

En cuanto al área II de estudio, se presentan materiales más finos, donde la gradación de los mismos varía hacia aguas abajo. Presentándose inicialmente arenas gruesas limosas se y/o arcillosas, tramo 1 y posteriormente hacia aguas abajo predominan las arcillas, tramo 2. En esta área II, aunque inicialmente en el tramo 1, se encuentren arenas el alto contenido de finos determina el comportamiento mecánico de los suelos en esta zona. En el tramo 2, los materiales son netamente arcillosos y su comportamiento es el característico de un suelo cohesivo. En el tramo 1, el comportamiento aunque es netamente cohesivo, la presencia de arenas hace que las propiedades de resistencia sean mayores en este tramo comparado con el tramo II.

Todos los resultados anteriores son relevantes para la evaluación de estabilidad de los taludes excavación que se tengan o se proyecten en alguna de las áreas de estudio incluidas en este documento y para los análisis de respuesta dinámica y el potencial de licuación de estos depósitos aluviales.