

**SIMPOSIO SOBRE INGENIERÍA GEOLÓGICA  
Bogotá, Noviembre 25 a 30, 1968**

**ALGUNAS APLICACIONES DE LA PETROGRAFÍA A LA INGENIERÍA CIVIL**

**INTEGRAL LIMITADA**

**Ingeniero Gerardo Botero Arango  
Asesor del Depto. De Geotecnia**

**Ingeniero José Gutiérrez Villegas  
Director del Depto. De Geotecnia**

**Ingeniero Rodrigo Alvarez Alvarez  
Geólogo Depto. de Geotecnia**

**Medellín, Noviembre de 1968**

## INDICE

	Pagina
<b>RESUMEN</b>	<b>III</b>
I. GENERALIDADES	3
II. APLICACIONES A LA INGENIERÍA CIVIL	5
III. PROPIEDADES GENERALES DE LAS ROCAS	7
1. Rocas Ígneas	8
2. Rocas metamórficas	9
3. Rocas sedimentarias	9
IV. EL BATOLITO ANTIOQUEÑO	10
Rocas encajantes	12
1. Anfibolitas	12
2. Serpentinias	13
3. Fílitias	14
V. PROPIEDADES Y USOS DE LAS ROCAS Y SUELOS DEL BATOLITO Y SUS ENCAJANTES EN OBRAS DE INGENIERÍA	14
Materiales para concreto	14
Características de las arenas naturales y de los cascajos en los depósitos sedimentarios	15
Materiales para carreteras	18
Bases	19
Llenos	
Construcción de túneles	
VI. CONCLUSIONES	

### **III. ALGUNAS APLICACIONES DE LA PETROGRAFÍA A LA INGENIERIA CIVIL**

#### **RESUMEN**

En este trabajo se hace primero un recuento del desarrollo de la Petrografía a través del tiempo, seguido de la enumeración de aquellos aspectos en que el petrógrafo puede colaborar eficazmente con el ingeniero civil en la solución de problemas específicos. Se resumen a continuación las propiedades generales de los tres grupos de rocas con respecto a su aplicación en la Ingeniería práctica.

Finalmente se estudian las propiedades geotécnicas de los suelos derivados de las rocas del Batolito Antioqueño y sus encajantes, relacionándolas con sus características petrográficas y haciendo hincapié en su utilización para la construcción de vías.

La mayoría de los conceptos se ilustran con casos prácticos reales tomados de la experiencia de los autores.

#### **I. GENERALIDADES**

Un ingeniero o aún un geólogo no especializado en petrografía que hojee un texto avanzado de esta materia, quedará sin duda un tanto sorprendido de la complejidad de las clasificaciones petrográficas que allí se muestran. Esta complejidad es el resultado de innumerables estudios efectuados desde mediados del siglo XVIII, cuando Carlos Linneo presentó el primer cuadro sistemático de clasificación de rocas y Minerales.

La historia que arranca de Linneo hasta hoy es larga y compleja. El desarrollo de la Mineralogía y de la Petrografía se confundió en sus etapas iniciales; realmente las rocas están compuestas de minerales y esta materia prima debió ser clarificada primero que las rocas, a menos en sus lineamientos generales. La segunda mitad del siglo pasado vio la aplicación del microscopio polarizante al estudio de los minerales y la propuesta de von Cotta (1862) de dividir las rocas en los tres grandes grupos clásicos: ígneas,

sedimentarias y metamórficas, grupos que aún hoy se conservan con algunas reservas naturales debidas a investigaciones recientes.

La aplicación de la óptica al estudio de las rocas trajo consigo la proliferación de las variedades de éstas, especialmente en las ígneas, la propuesta de esquemas de clasificación más detallados y, a principios de este siglo, la tendencia de lo cualitativo a lo cuantitativo en dichas clasificaciones.

Paralelamente con las clasificaciones que han usado los minerales presentes en las rocas y las relaciones de tamaño, cristalinidad, fábrica, etc., en una palabra sus texturas, se desarrollan desde finales del siglo XIX las basadas en la composición química de las mismas. Las escuelas europeas (Osann, Niggli, etc.) y americanas (C.I.P.W.) tratan de fijar criterios netos en la separación de las rocas con base en la proporción de óxidos que las componen, analizados químicamente y aplicados a la reconstrucción de minerales ideales que forman la norma de la roca, en contraprestación de los minerales que naturalmente se hallan en ella que son llamados modales.

Las numerosas clasificaciones propuestas hasta hoy indican que ninguna satisface las necesidades del petrógrafo; se trata de separar en nichos lo que naturalmente es un continuo y de ahí las múltiples zonas comunes a dichos grupos. Moderadamente, la aplicación de otros métodos de ensayo como el Análisis Térmico Diferencial (ATD), rayos X, microscopio electrónico, etc., han hecho de la petrografía un estudio más exacto y al mismo tiempo han iniciado una simplificación de los complejos sistemas taxonómicos de las rocas, especialmente de las ígneas y metamórficas, tendiendo a usar la genética de estos grupos de rocas para grupos más sencillos y homogéneos.

La Petrografía, como descripción de las rocas, se ocupa también, al menos en sus formas sencillas, de las estructuras de las mismas. Dentro de esta categoría pueden incluirse las diaclasas, fallas, plegamientos, esquistosidades, estratificación, formas de plutones y derrames, etc. Varias ramas geológicas se ocupan del estudio detallado de esta característica, especialmente la Geología Estructural, incluyendo el análisis de petrofábrica.

## **II. APLICACIONES A LA INGENIERÍA CIVIL**

El mundo complejo de las rocas del petrógrafo se simplifica extraordinariamente desde el punto de vista del ingeniero dedicado a obras civiles. El especialista en movimientos de tierra ha clasificado por muchos años las rocas en función de la competencia de trabajo de la topadora en tierra, “conglomerado” y roca; en este último caso entran a figurar los explosivos en la remoción de los materiales. La escasa docena de rocas mencionadas en estudios de fundaciones, es una de las más numerosas presentaciones de petrografía en aplicaciones de ingeniería civil. Considerando un pragmatismo estricto, no es necesario ir más allá de estas necesidades elementales de petrografía en la ciencia de las rocas. Pero la construcción de obras cada vez más delicadas y costosas ha traído consigo un refinamiento del estudio de los materiales utilizados en esas construcciones y es aquí donde la petrografía es cada vez más usada como una ayuda en la investigación de dichos elementos.

Normalmente el petrógrafo es un verdadero científico de formación teórica que se interesa por el comportamiento de las rocas en condiciones ideales y que se preocupa principalmente por la relación entre las variables que parecen controlar las propiedades físicas de ellas. Su enfoque científico tiene aplicaciones en la práctica de la Ingeniería civil, pero debe tenerse en cuenta que el conocimiento detallado de la composición de una roca no es garantía absoluta de su bondad en determinados casos. Por lo tanto, el ingeniero civil deberá apreciar a cabalidad que los estudios del petrógrafo son una guía muy útil para orientar una decisión pero no lo relevan de la obligación de poseer experiencia suficiente para aplicar con éxito los datos del petrógrafo. Esta experiencia sólo se consigue después de años de estar en continuo contacto con las condiciones que existen realmente en el campo y de analizar rigurosamente el desempeño de las obras en función de los aspectos notorios de las características de los materiales que entraron en su construcción.

El petrógrafo y el geólogo le dan al ingeniero civil la base para poder definir la aplicación de los materiales a proyectos específicos y predecir su futuro comportamiento, ya que sus experiencias previas le ayudan a organizar, interpretar y evaluar los nuevos datos.

Bajo las consideraciones anteriores, el trabajo del petrógrafo es muy útil en la Ingeniería civil, especialmente porque su colaboración contribuye en forma precisa a cumplir los siguientes objetos:

1. Ayudar al geólogo estructural en la definición de la estructura de un sitio especial y su correlación con otras formaciones (localización de fallas por ejemplo).
2. Colaborar en la determinación de las propiedades de las rocas que tienen importancia desde el punto de vista de la ingeniería, bien sea que estén presentes en una obra o que se vayan a usar como materiales de construcción.
3. Definir la extensión probable de ciertos fenómenos que reflejan desfavorablemente en las propiedades de las rocas. Por ejemplo, el petrógrafo puede decir claramente si una masa de roca está alterada por meteorización (fenómeno relativamente superficial) o por acción hidrotermal (cuyos efectos pueden llegar a ser muy profundos).
4. Eliminar mucho trabajo de laboratorio que puede ser innecesario, por ejemplo ensayando los materiales áridos para concreto. En muchos casos se evita perder tiempo en la elaboración de mezclas que son muy demoradas y costosas. Estas sólo se harían en casos dudosos, cuando el examen petrográfico no llegue a conclusiones definitivas. Por otra parte, debe tenerse en cuenta que los factores petrográficos o geológicos son a veces más importantes que las consideraciones basadas en ensayos de laboratorio, o aún puede llegar el caso de que estos sean invalidados totalmente, o viceversa. Por ejemplo en una misma cantera cuya formación geológica corresponde a una pegmatita neisoide, fracturada en forma variable, con 80% de cuarzo de grano fino y grueso, poca plagioclasa y ortosa, anfíbol y cloritoide en un 10% a 15% (todos ellos completamente sanos), se encontró que la resistencia a la abrasión de la máquina de Los Ángeles tenía un valor promedio de 40% y que la durabilidad al sulfato de sodio fluctuó alrededor del 12%, para cualquier grado de fracturación; sin embargo al ejecutar mezclas de concreto con esos materiales, en igualdad de condiciones se obtuvieron resistencias a la compresión a los 7 días que variaron entre 126 y 252 kg/cm<sup>2</sup> (1790 y 3560 lbs/pulg<sup>2</sup>), anormalmente altos si se comparan con las resistencias que se obtendrían en las mismas mezclas preparadas con materiales

aluviales que tuvieran los mismos desgastes y abrasión pero no fracturados. El concepto del petrográfo en ese caso fue contrario a los que pudiera esperarse o sea que la fracturación incidió más en los ensayos de laboratorio que en la resistencia de las mezclas.

5. Predecir las propiedades de las rocas desde el punto de vista de Ingeniería ya que estas resultan de la textura, estructura y composición características que se estudian por medios petrográficos. Por ejemplo, durante el proceso de meteorización de rocas granitoides se hidratan primero los feldespatos y aumentan el tamaño. Debido a la combinación entre la textura y la composición mineralógica, el aumento de volumen de los feldespatos trata de separar los otros minerales en tal forma que las partículas de roca se desintegra con relativa facilidad por acción de impacto y la abrasión hasta llegar en muchos casos a sus componentes granulares. Se ha observado que estos procesos dan por resultado un material de muy buena gradación, alta densidad, gran resistencia y baja comprensibilidad cuyo desempeño en bases para pavimentos flexibles es muy satisfactorio.
6. Suministrar datos cualitativos y cuantitativos acerca de las características de las rocas, las cuales sirven para definir en un caso dado si el comportamiento del material se debe a una característica decisiva controlante.
7. Establecer bases firmes para la interpretación de experiencias en lugares en los cuales se identifiquen formaciones petrográficamente semejantes o iguales a aquellas en que se tenga la experiencia previa. Es evidente que también la topografía y clima debe ser comparables.

### **III PROPIEDADES GENERALES DE LAS ROCAS**

Es imposible hacer una generalización sobre el comportamiento de las rocas en estructuras civiles atendiendo únicamente a su origen geológico, ya que los procesos posteriores (meteorización, tectonismo, etc.) pueden ser más significativos e incidir más fuertemente en su comportamiento. Como fundación para estructuras y construcción de obras subterráneas, deben estudiarse muy cuidadosamente su resistencia, estructura y su permeabilidad. Sin embargo, la experiencia ha indicado que pueden aplicarse en sus tres grandes grupos los siguientes conceptos generales, cuando las rocas están

sustancialmente sanas; y especialmente en lo que se refiere a materiales de construcción para obras civiles.

1. Rocas Ígneas: La mayor parte son duras, fuertes, densas y resistentes a los agentes meteorizantes. Aunque en ciertas formaciones se presenten muy fracturadas por razones diversas, son muy buenas como materiales de construcción. Cuando han sufrido un proceso erosivo y se encuentran en aluviones a lo largo de los lechos de los ríos y en las terrazas, pueden perder muchas de sus propiedades, de tal manera que ya no sean útiles para ciertos fines. Tal es el caso que se presentó en la construcción de las obras de la Central Hidroeléctrica de Guadalupe, donde fue necesario emplear la cuarzodiorita que predomina en el área, después de triturarla a partir del material sano que se obtenía en la excavación de los túneles, ya que en los aluviones (formados principalmente por clásticos de la misma roca), se encontró un alto porcentaje de partículas meteorizadas, otras muy porosas y además un exceso de mica, de manera que las mezclas de concreto no llegaban a tener las resistencias requeridas a pesar de usar altos contenidos de cemento.

Del concepto general expresado atrás deben excluirse en principio las tufas y ciertas lavas que son demasiado porosas, aunque, dado el caso, podrían emplearse en concretos livianos, Por otra parte, conviene anotar que las rocas volcánicas y algunas sedimentarias generalmente contienen sílice coloidal (ópalo, calcedonia) o fácilmente combinable (tridimita, vidrio volcánico), que pueden crear problemas cuando entran en contacto con cementos altamente alcalinos (aquellos en los cuales el contenido  $\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{K}_2\text{O}$  es mayor de 0.6%) porque se producen reacciones expansivas que conducen a un deterioro rápido del concreto.

Recientes análisis de cemento que se usan en el oriente de la república, precisamente donde se encuentra este tipo de rocas con relativa frecuencia; dieron los siguientes resultados:

Marca	Na <sub>2</sub> + 0.658 K <sub>2</sub> O
Diamante (Fca. Apulo)	0.625%
Samper (Fca. Bogotá)	0.412%
Boyacá (Fca. Boyacá)	0.640%
Diamante (Fca. Buenos Aires)	0.675%
Nare (Fca. Pto. Inmarco)	0.739%

2. Rocas metamórficas: En este grupo podríamos hacer una distinción basada en la foliación, es decir, si está acentuada o no. Entre las menos foliadas o aún las verdaderamente cristalinas podemos agrupar los mármoles, las cuarcitas, las ortoanfibolitas, los neises cristalinos y las serpentinas, que son usualmente muy durables y fuertes, masivas, duras y resistentes. Al triturarlas no muestran tendencia muy marcada a dar partículas largas y aplanadas o en lascas. En el segundo grupo estarían todas las rocas de bajo grado de metamorfismo tales como las filitas, los esquistos en general, las micacitas y las pizarras, las cuales generalmente están finamente laminadas, de manera que tienen tendencia a dar partículas aplanadas y con frecuencia tienen cantidades apreciables de minerales débiles (como la mica). Con estos materiales no se consiguen restricciones adecuadas en el concreto.

3. Rocas Sedimentarias: En términos prácticos podrían dividirse desde el punto de vista de competencia para obras de ingeniería en dos grandes miembros, a saber: 1) silíceo y 2) arcillosos. Comprendidos en el primer grupo estarían las areniscas, aunque éstas en algunos casos son friables o excesivamente porosas debido a la cementación imperfecta entre los granos constituyentes, las calizas silíceas, los pedernales ("cherts"), las lutitas (shales) silíceas y las grauvacas que generalmente son duras (dependiendo del grado de cementación). En las calizas es frecuente el caso de que los canales de solución que ocurren en muchas formaciones a veces se encuentren rellenos de arcillas muy plásticas (Ej.: Zahorra de Cartagena). Esta situación convierte este material en indeseable para bases de pavimentos. En el segundo grupo se incluirían las lutitas, limolitas, arcillas consolidadas, etc., que no resisten los agentes meteorizantes y que en algunos casos tienen propiedades expansivas; además se desintegran rápidamente en contacto con el agua.

Como originalmente están finamente estratificados, la trituración de partículas planas y lajas. En cuanto a los pedernales (cherts), a menudo tienen apreciable cantidad de sílice combinable que reacciona rápidamente con los álcalis del cemento.

En la cordillera Oriental y en la costa atlántica son muy usadas las rocas del primer grupo como material para la construcción de pavimentos y estructuras de concreto.

#### **IV. EL BATOLITO ANTOQUEÑO**

En la región central de Antioquia aflora un cuerpo intrusivo (batolito) que cubre unos 8000 km<sup>2</sup>, formado comúnmente por una diorita cuarzosa (tonalita), que en estado fresco tiene la siguiente composición mineralógica promedias:

Feldespatos (plagioclasa)	52.0%
Cuarzo	22.0%
Ortosa	5.5%
Biotita	11.5%
Hornblenda	8.0%
(Lo restante es accesorio)	

Plutones de la misma petrografía ocupan varios miles de kilómetros más en el sur de Antioquia y en el norte de Caldas.

Otros similares existen en varias áreas de Colombia.

La meteorización de esta roca se efectúa en el sentido usual de hidratación y oxidación de feldespatos y ferromagnesianos; el producto extremo son arcillas con mezcla de cuarzo y el intermedio feldespatos caolinizados, micas y cuarzo. Detallando un poco se encuentra que el manto de suelo residual puede dividirse en tres zonas, que corresponden a diferentes grados de meteorización de la roca madre, a saber: 1) una capa superficial delgada, cuyo espesor promedio es de aproximadamente un metro, constituida por arcillas (grupo MH), que son la última etapa de meteorización del material presente en la zona, cuyas características más importantes son: plasticidad, humedad y compresibilidad altas y densidad, resistencia a la cisalladura y capacidad de soporte bajas. Su estabilidad

en cortes es pobrísima y como material de relleno no debe usarse. En el ensayo de compactación Proctor estándar se consiguen valores promedio de  $1.45 \text{ gr/cm}^3$  para la densidad máxima y 28% para la humedad óptima. 2) Inmediatamente por debajo de esta capa se encuentra otra de limos arenosos rojizos (grupo ML), cuyo espesor varía entre 5 y 15 metros, en la cual puede observarse todavía la textura original de la roca, pero con los minerales constituyente totalmente descompuestos, con excepción del cuarzo. Esta zona presenta mejores características en cuanto a la capacidad de soporte y resistencia a la cizalladura del material y tiene mayor densidad y menos plasticidad y contenido de humedad que las de la capa superior. Como valores típicos podrían tomarse los siguientes: límites líquido entre 30% y 48%, índice plástico variable entre 2% y 15%, ángulo efectivo de fricción promedio de  $32^\circ$  y cohesión efectiva alrededor de  $0.1 \text{ kg/cm}^2$ . Las densidades máximas fluctúan entre  $1.51$  y  $1.59 \text{ gr/cm}^3$  para humedades óptimas del 23%.

La composición mineralógica de estos limos, según resultados de análisis Térmicos Diferenciales y Rayos X, es la siguiente: En la muestra total:

Cuarzo	35%
Caolinita	42% a 60%
Gibbsita	0 a 16%
Ilita (mica)	5 a 7%

En fracción fina (65% del total):

Kaolinita	65 a 93%
Gibbsita	0 a 25%
Ilita	7 a 10%

3) La tercera capa con un espesor promedio de unos 20 metros, está constituida por material gris blancuzco de roca descompuesta (arena limosa, grupo SM de la Clasificación unificada). En esta capa también se conserva muy bien la textura de la roca original pero con los granos constituyentes descompuestos en menor grado que los de la capa anterior; este material no es plástico ni cohesivo y presenta buenas características de sustentación y resistencia a la cizalladura, cuando está en estado inalterado. El ángulo efectivo de fricción es de unos  $38^\circ$ . Las densidades Proctor estándar varían entre  $1.59$  y  $1.67 \text{ gr/cm}^3$  para humedades del 19% y 21%. Generalmente se encuentran bolas de

roca dura dentro de la capa de roca descompuesta, en las cuales la exfoliación es muy característica. Por debajo de las capas de suelo residual sigue una zona en donde la roca está muy fracturada. En la estructura original de la roca los sistemas de grietas o fracturas forman bloques más o menos cúbicos. El proceso de meteorización avanza con relativa facilidad por las grietas y redondea las aristas dando origen a las bolas de roca típicas de la formación. Esta zona, que puede tener un espesor promedio de unos 10 m, tiene como basamento la roca madre en estado sano aunque en ella no son escasas las diaclasas, grietas, etc., resultantes del enfriamiento del plutón y de la tectónica que afectó la región.

Como resultado de alteraciones topográficas y de la pluviosidad (de 3 a 6 metros anuales), se observa que el espesor de los diferentes tipos de materiales antes descritos varía de un lugar a otro. En el lecho de los ríos, tanto el manto superior de arcilla como la parte intermedia compuesta por los limos arenosos rojizos, han sido erodados por las aguas corrientes dejando depósitos de bolas de piedra, que son el resultado de una combinación de derrumbes, erosión y reptación del manto. Dichas bolas se encuentran mezcladas con una capa de depósitos aluviales constituida por una mezcla de cascajo, arena, limo y materiales orgánicos.

### ROCAS ENCAJANTES

Rodeando el batolito se encuentran las rocas metamórficas encajantes, de las cuales las más importantes son las anfibolitas, las serpentinitas y las neises.

1. Anfibolitas: Son las más antiguas en la región, tienen una textura que varía entre néisica y esquistosa, algunas veces bandeada por segregación diferencial de feldespatos y hornblendas. Predomina el color negro, pero cuando se cloritiza adquiere un tinte verdoso oscuro. Su composición mineralógica promedia es:

Hornblenda	50 a 75%
Plagioclasa	25 a 50%
Titanita	hasta 4%
Óxidos de hierro	hasta 8%

Como minerales accesorios están el cuarzo, el circón, la biotita y la apatita. Son rocas resistentes a la meteorización y en general forman las mayores salientes topográficas, se meteorizan a arcillas de colores amarillos, verdes, pardo y rojizos.

Las arcillas amarillas tienen las siguientes propiedades promedias:

Límite líquido	= 55%
Índice plástico	= 22%
Peso específico	= 2.70
% - 200	= 68%

Grupo MH de la Clasificación Unificada

Compactación Proctor Standard:

Humedad óptima: 20 a 35%

Densidad máxima: 1.33 a 1.67 gr/cm<sup>3</sup>

Como característica especial debe mencionarse su alta expansión, la cual indica que son muy susceptibles a cambios de volumen por variaciones en su estado de humedad. Esta posibilidad de cambios de volumen favorece en gran parte el movimiento de reptación de la capa superior del suelo en laderas inclinadas y por otra parte va debilitando su estructura en forma gradual, paulatina e inexorable. El fenómeno descrito tiene graves repercusiones sobre las estructuras que se asienten en este tipo de suelo.

En cuanto a las arcillas de color pardo rojizo, se anota que por corresponder a un estado avanzado de meteorización son menos plásticas e inactivas.

Serpentinas: Roca maciza de grano fino, a veces bandeada, cuyo color varía de gris a verde oscuro. Los minerales que la componen son antigorita y serpofita hasta un 90%, con promedio de la primera. Es considerablemente resistente a la erosión, pero su alta fracturación ayuda a los fenómenos de hidratación, oxidación y solución hasta dejar un suelo residual muy rico en hierro con pequeñas cantidades de sílice, alúmina, cromo y níquel y cobalto.

Los suelos residuales de esta roca se caracterizan por su alta plasticidad (límite líquido entre 70% y 90%, índice plástico entre 20% y 35%, grupo MH), bajo contenido de coloides

y alto peso específico, del orden de 3.1 a 3.2. No son activas y su color normal es pardo-rojizo oscuro.

A pesar de lo que podría esperarse, en esta región las formaciones en serpentina son muy estables y resistentes a la erosión.

3. Filitas: Contiene cuarzo, anfíboles y bastante mica, textura foliada en extremo que no permite considerarla como una roca maciza. Su color es generalmente gris oscuro y a veces se altera a colores claros. Muchas veces tienen el aspecto de un esquisto grafitoso negruzco. Son fácilmente atacables por los agentes meteorizantes. Su dureza y resistencia son muy bajas y su estabilidad muy precaria.

## **V. PROPIEDADES Y USOS DE LAS ROCAS Y SUELOS DEL BATOLITO Y SUS ENCAJANTES EN OBRAS DE INGENIERÍA.**

De acuerdo con nuestra experiencia, las características de las diferentes rocas importantes que se encuentran en la zona central de Antioquia y en especial en valle del río Medellín y las montañas que lo encierra, se reflejan de una manera decisiva en su comportamiento como material de construcción o en las propiedades de los suelos residuales a que dan lugar después de estar sometidas a los procesos meteorizantes y erosivos.

### **Materiales para concreto**

La pobreza clásica en materiales para concreto en la región que no ocupa es el resultado de la petrografía donde domina el Plutón o Batolito Antioqueño, cuyas características importantes ya fueron examinadas atrás.

En los valles inmaduros de la región, los aluviones, fuente más económica de áridos para concreto, están formados por productos intermedio sólo utilizables para concretos de resistencias relativamente bajas. En una extensa zona correspondiente a la meseta que corona al batolito, es necesario triturar la cuarzo-diorita en estado fresco y transportar la arena de fuentes originales a partir de otras rocas o aluviones de segunda o tercer

concentración, donde han desaparecido la mica y los feldespatos caolinizados y se ha concentrado el cuarzo.

En problemas específicos es importante muchas veces evaluar la necesidad y la justificación de usar piedra triturada en lugar de cascajo aluvial para la manufactura de concreto, a pesar de que este último es siempre muy deseable por varias razones, entre ellas:

- 1) las partículas usualmente son redondeadas, lo cual exige una menor relación A/C para una trabajabilidad dada (menos gasto de cemento).
- 2). las corrientes ejercen una acción selectiva que puede mejorar la gradación
- 3). La abrasión que produce el transporte y la depositación tiende a eliminar la mayoría de las partículas débiles.

#### Características de las arenas naturales y de los cascajos en los depósitos sedimentarios:

Aunque la heterogeneidad en la disposición de los materiales gruesos y finos es muy marcada tanto en el sentido horizontal como en el sentido vertical, en cuanto a su aceptabilidad para la manufactura de concreto, las diferencias dentro de un mismo depósito no son apreciables. En un caso típico se encontró que había diferencias o excesos de unos tamaños, que la arena contenía altos porcentajes de mica (elemento indeseable) y que muchas de las partículas de cascajo estaban meteorizadas y otras eran muy porosas, fuera de que se encontraban grumos de arcilla en cantidad apreciable y basuras. Sin embargo, procesado y proporcionado el cascajo podía llegar a cumplir las normas requeridas y se podían obtener concretos de resistencia adecuada.

Surgió entonces la pregunta de si los agregados en estado natural eran aceptables. La respuesta sólo se podía obtener teniendo en cuenta la economía general de la obra y la importancia relativa de la estructura de concreto. En cualquier caso se deben hacer todos los esfuerzos posibles para obtener dentro de ciertas limitaciones, principalmente económicas, las mejores resistencias en el concreto.

Aparentemente el uso de partículas sanas y duras se refleja especialmente en la durabilidad del concreto. Suponiendo el caso de un pavimento de concreto hay tres tipos principales de ataques a la losa:

- 1). Expansión y contracción debidas a secadas y mojadas alternadas, así como ciclos de calor y frio que producen desintegración o agrietamiento del concreto.
- 2). Erosión superficial debida a los agentes atmosféricos y especialmente al efecto de las llantas de los vehículos.
- 3). Reacciones químicas con los ácidos orgánicos, los sulfatos, el hierro y otras sales inorgánicas que arrastren las aguas o que pueden ascender del suelo. El uso de agregados duros y sanos aumenta grandemente la resistencia del concreto a estos ataques destructivos. La evaluación de la necesidad de reemplazar agregados aluviales con piedra triturada para agregados de concreto, requirió la interpretación del axioma “la buena ingeniería permite solo la aceptación de los mejor, cuando éste se puede conseguir a un costo justificable”. El criterio para adoptar una decisión a favor de los agregados triturados se basa en las siguientes razones:

- 1). La durabilidad del concreto es un factor esencial en toda carretera de importancia.
- 2). Su durabilidad es difícil de medir y correlacionar por medio de ensayos de laboratorio.
- 3). Es más fácil controlar su calidad cuando se utilizan agregados triturados que cuando los áridos proceden de un depósito aluvial.

En los depósitos sedimentarios a lo largo del rio Medellín se ha observado que la composición petrográfica de los áridos para concreto varía desde la parte alta, donde predominan las filitas seguidas en orden de importancia por esquistos cuarzo-sericíticos, cuarzo y clástos de roca verdes, hasta la parte baja en donde las partículas dominantes son de anfibolitas seguidas de serpentinitas, cuarzos lechosos, cuarzo-dioritas y micacitas. Las resistencias a la compresión del concreto para mezclas cuya única variable es el tipo de agregados (que cambia de acuerdo con la procedencia) a causa un aumento notable a medida que las fuentes de materiales están más bajas. Es decir que la distancia longitud de acarreo selecciona muy claramente los clástos de tal manera que en la parte inferior del valle sólo se han depositados los que resistieron la abrasión producida por el arrastre.

Aunque el fenómeno es independiente del aspecto petrográfico del problema, conviene señalar que en los valles de los ríos de las mesetas, los agregados usualmente muestran un alto contenido de materia orgánica, casi imposible de remover por métodos mecánicos (lavado) porque está firmemente adherida a la superficie de los granos. Esta película impide la adherencia del mortero de concreto al cascajo y por consiguiente no se pueden conseguir resistencias aceptables en el concreto. Es forzoso en estos casos usar como agregado grueso un triturado de cuarzo-diorita o anfibolita para mejorar las resistencias, lo cual se logra a pesar de que la arena sea de calidad inferior. Claro que en estas condiciones las resistencias, máximas son limitadas, dependiendo de las que se pueden obtener en el mortero que actúa como límite o cuello de botella.

Hay otra clase de fuentes de agregado fino dentro del batolito que son las llamadas arenas de peña, donde la roca carece de ferromagnesianos, de manera que la meteorización se manifiesta por separación de los granos y así son fácilmente explotables por métodos simples como el monitor, cuyo chorro desintegra la formación. Un caso típico es el de la cantera Mococongo en la Central Hidroeléctrica de Riogrande, sitio donde se obtuvo la arena para las obras civiles en la etapa final ya que inicialmente se transportó desde Medellín (62 km), porque se tuvieron dudas de que fuera apta para obtener concretos de buena calidad. La composición mineralógica promedio de esta arena es como sigue:

Cuarzo	64.4%
Feldespatos	32.7%
Hornblenda	0.5%
Biotita y moscovita	0.9%
Clorita	0.2%
Limolita	Trazas (cementante)
Mixtos	1.3%

Ante los resultados de este análisis petrográfico, cabe preguntar si el feldespatos sano es objetable en una arena para concreto y si lo es cuando está parcialmente caolinizado o afectado por planos de clivaje.

Las características fundamentales de cada uno de los minerales presentes en esta arena pueden resumirse así:

**Cuarzo:** Sobre el cuarzo no hay duda de que es un excelente material por su dureza y porque es difícilmente alterable.

**Feldespato:** Si está absolutamente sano no es perjudicial; adhiere tan fácilmente al cemento como el cuarzo. El hecho de que siempre esté asociado en su descomposición con la arcilla conduce a sospechas en cuanto a su uso para concretos de buena calidad. Si está alterado superficialmente es decir cubierto con una pequeña capa de caolín, puede adherirse al cemento y en consecuencia, pueden llegar a ser peligroso. Cuando los granos están muy fracturados, rebajan la resistencia del mortero; sin embargo, con un buen lavado se consigue separarlos en cristales puros y en harina de caolín y esta última se puede lavar fácilmente.

**Hornblenda:** no ofrece ningún inconveniente.

**Mica:** Para la fabricación de concretos la mica es mala debido a su falta de dureza y cohesión y al hecho de que exfolia fácilmente. El lavado riguroso elimina parte de este mineral indeseable.

Por las razones expuesta y por el desempeño del concreto en las obras de la carretera central y también por el pavimento de la carretera Troncal del Norte entre Matasano y Santa Rosa, donde igualmente se usó, se deduce que las arenas ricas en feldespato pueden usarse sin temor si éste está fresco o si por lavado se puede limpiar el caolín que forma la película superficial y disgregar los granos cuando están parcialmente alterados.

Finalmente, conviene añadir que, en general, las arenas del batolito, bien sean aluviales o de peña, tienen un contenido alto de mica que excede los límites normales de aceptación. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que con ellas se obtienen resistencias aceptables siempre y cuando las partículas no sean muy grandes, su contenido excesivo y que este hecho no coincida con un contenido alto de materia orgánica.

Materiales para carreteras:

En estos párrafos se hace mención especial de los suelos y rocas del batolito en cuanto a su utilización en una vía carretable bien sea desde el punto de vista de conformación de la rasante (estabilidad de taludes, ejecución de cortes, construcción de llenos), sino también como parte integrante de la estructura del pavimento (subrasante, base y capa de rodadura) tanto en concreto como en asfalto.

Bases: La resistencia y la estabilidad de una base para pavimento flexible se obtienen principalmente por la fricción interna entre los áridos gruesos y la cohesión que suministra el material fino granular que debe llenar completamente los espacios vacíos que dejan los primeros. Para que la fricción interna sea alta, se necesita que el agregado grueso sea bien gradado, denso, duro y relativamente sano y para que la cohesión sea alta, se necesita que el ligante arcilloso (aglutinante) tenga un límite líquido máximo entre 25 y 30% y un índice plástico que normalmente no exceda valores entre 6 y 8. Cuando se usan materiales cuyos límite líquido e índice plástico son superiores a los indicados, la experiencia ha demostrado que la base tiende a absorber agua y, por consiguiente, a perder estabilidad muy fácilmente. Aunque las especificaciones no requieren una plasticidad mínima para el elemento ligante, es necesario que de todas maneras exista una fuerte cohesión entre las partículas de agregado, lo cual se obtiene a través de cierta plasticidad en el suelo fino granular. Fuera de estos requisitos es importante que la compactación sea alta, ya que en la mayoría de los casos la resistencia de la base, medida por cualquiera de los métodos usuales, aumenta en proporción directa a la densidad. La densidad de una base depende en gran parte de la gradación de sus agregados. Para obtener buenos resultados se necesita que la curva representativa de esta característica varíe uniformemente desde tamaños gruesos hasta los finos. Sólo en raras ocasiones se obtienen en la naturaleza canteras de material que cumpla por sí solos con estos requisitos. De manera que en la mayoría de los casos es necesario combinar dos o más materiales para llegar al resultado deseado. Un caso típico es el de una cantera en la cual se beneficia material triturado a partir de una serpentina (roca metamórfica procedente de una roca ultrabásica). En el sitio se encuentra muy fracturada y cubierta por una sobrecapa, de suelo bastante plástico, producto de alteración de la roca original. Al hacer la explotación sin tomar muchas precauciones, el material sale muy revuelto (roca y arcilla), cerca de la cantera y con origen geológico semejante, se encuentran mantos superficiales de suelo limo-arenoso de plasticidad relativamente baja.

Para conseguir un material que estuviera dentro de las especificaciones establecidas, para el caso, se usó una mezcla de 75% de material triturado y 25% de material limo arenoso. El comportamiento de esta base, usada en la pavimentación de calles en Medellín es bastante satisfactorio. Se aceptó un límite líquido un poco mayor del especificado, porque la experiencia demostró que su influencia no era muy notoria. Este tipo de base, sin capa de rodadura de ninguna clase, ha resistido todos los agentes erosivos, incluyendo corrientes de aguas lluvias superficiales en pendientes del orden de 30° sin mostrar deterioros visibles.

Esta serpentina tiene un porcentaje de pérdida en el ensayo de durabilidad con sulfato de sodio que varía desde 1% hasta 15.3% una pérdida al desgaste en la máquina de Los Ángeles entre 8.5% y 15.4%, siendo menor en los tamaños gruesos.

Llenos: se discutieron atrás las propiedades generales de los suelos residuales del batolito los limos arenosos, una vez compactados, son relativamente densos y tienen una resistencia moderada a la cizalladura. La roca descompuesta es un suelo granular fino de alta resistencia a la cizalladura y un poco más denso que los limos, condiciones éstas que lo hacen apropiados para la construcción de los respaldos de terraplenes, aunque exigen protección por ser muy erodables.

Densidades para diseño: la densidad promedio de compactación que puede obtenerse en la obra con un buen control depende especialmente del contenido de humedad del suelo en el momento de ser colocado.

La alta pluviosidad en el área hace que no sea práctico, si no imposible, la compactación del suelo a una humedad correspondiente a la óptima en el ensayo Proctor estándar, ya que las humedades naturales en los préstamos están casi siempre por encima de la óptima en cualquier época del año. A sabiendas de que las presiones intersticiales durante la construcción del terraplén van a ser altas y de que éste es un factor definitivo para la estabilidad de la obra en el tiempo que tarda la consolidación total, es necesario hacer el diseño del terraplén para una humedad de colocación mayor que la óptima con el objeto de permitir una construcción rápida y económica. De no ser así, habría necesidad de recurrir a secar los materiales en las áreas de préstamo, lo que encarecería apreciablemente la obra, al mismo tiempo que aplazaría el período de construcción de la

misma. La humedad y la densidad de colocación variarán naturalmente con la pluviosidad de la zona y con las humedades naturales que se encuentren en las zonas de préstamo, que normalmente son mayores que las óptimas, aún en épocas de verano.

Partiendo del principio de que el diseño de un terraplén debe basarse en las condiciones reales de los materiales disponibles y no en buscar materiales que se ajusten a un diseño dado, nuestra experiencia indica que el funcionamiento de un terraplén es satisfactorio (aún en el caso de presas de tierra de altura considerable) cuando en el campo se consiguen densidades que estén por encima del 95% de la máxima teórica (curva de 100% de saturación) para la humedad dada. Recordando que en el ensayo Proctor estándar, los valores para la humedad óptima y densidad máxima para los limos del Batolito Antioqueño son el promedio 22% y  $1.59 \text{ g/cm}^3$ , en el caso de la represa de Troneras, las humedades de colocación fluctuaron entre 20% y 36% y las densidades variaron desde 1.31 hasta  $1.72 \text{ g/cm}^3$ , pero siempre por encima del 95% de la densidad teórica. El margen tan amplio de variaciones no dará lugar a prejuicios en la estructura si se consigue un porcentaje alto de compactación de acuerdo con la humedad y si no hay concentraciones de puntos con alta o con baja densidad. El tiempo que tomará la consolidación de terraplenes altos variará entre 4 y 6 meses.

Asociado con la petrografía de la roca del batolito está el hecho de que las partículas de los suelos resultantes por meteorización puede quebrarse posteriormente a su colocación, cuando estando en un terraplén reciben una carga adicional, fenómeno que daría lugar a un asentamiento instantáneo. Este fenómeno ha preocupado mucho a los diseñadores de presas de tierra que hasta hace muy pocos años no se atrevían a usar este tipo de suelos. Tanto los ensayos de laboratorio como los de campo indican que en este suelo no se presenta el fenómeno descrito. Además, el hecho de que los asentamientos de las presas construidas en Antioquia y de sus fundaciones sean pequeños después de la construcción, indica que no hay trituración posterior de los granos de suelo en el lleno, ni colapso de la estructura del suelo de la fundación.

#### Construcción de túneles:

El suelo residual del batolito varía desde roca descompuesta (arena limosa) muy dura y gris hasta limo arenoso blando y rojizo. La característica importante común a todo el

suelo residual inalterado es su cohesión, inherente, la cual puede destruirse fácilmente por remoldeo. El comportamiento del suelo cuando se destruye su cohesión, varía como entre el de una arena suelta y el de un limo fino, dando lugar a altas presiones sobre los entibados. Cuando está inalterado no se derrama y las presiones son relativamente bajas.

Cuando este material está relativamente seco, la apertura de túneles es fácil. Como tiene alguna cohesión, el techo que quede descubierto desde el último arco se sostiene hasta la colocación del próximo. Cuando se satura la presión del agua de infiltración hacia el túnel reduce el período de estabilidad. La colocación de arcos no se puede demorar. Cuando el flujo concentrado pasa por las fracturas originales de la roca madre que permanecen en el suelo, el trabajo queda en estado de emergencia. Se formarán canales de erosión que rápidamente producirán deslizamientos.

## **VI. CONCLUSIONES**

- 1.- La petrografía es una ciencia auxiliar, muy valiosa de la Ingeniería Civil. Las conclusiones del petrógrafo sirven para orientar las decisiones del Ingeniero Civil. Como la formación del primero es muy científica, necesita para la aplicación de sus conocimientos la experiencia del segundo.
- 2.- La sola clasificación de las rocas en los tres grandes grupos no es suficiente para juzgar sobre su competencia el punto de vista de Ingeniería. Algunos procesos geológicos posteriores tienen mayor influencia en su comportamiento. La composición y propiedades de las rocas se reflejan decisivamente en las características de los materiales de construcción que de ellas se obtienen y en los suelos residuales que originan. El concepto de petrógrafo es decisivo en ciertos casos, por ejemplo, cuando los agregados para concreto contienen minerales que pueden reaccionar con cementos ricos en álcalis.
- 3.- Para que un diseño sea satisfactorio y económico, es muy importante que el ingeniero lo haga de acuerdo con las condiciones reales del sitio, en lugar de adecuar el lugar a las características del diseño. Como un ejemplo de este criterio general se recomienda un concepto sobre el grado de compactación en

terraplenes (distinto del normalmente usado) para casos en que la humedad natural del suelo en cualquier época del año, esté siempre por encima de la óptima, de acuerdo con el ensayo normal de compactación.

- 4.- Es un axioma que en cualquier caso se debe usar lo mejor, siempre y cuando esto se pueda lograr a un costo razonable. Por ejemplo, en el área del Batolito Antioqueño, es forzoso usar arena de calidad inferior (ricas en mica, feldaspatos parcialmente caolinizados, etc.) porque las de buena composición petrográfica resultan excesivamente costosas.
  
- 5.- Los diseñadores de presas de tierra han sospechado siempre la baja calidad bondad de los suelos residuales para la construcción del terraplén y del funcionamiento de la fundación, por la posibilidad de que se presenten asentamientos instantáneos, peligrosos por ruptura de la estructura del suelo al entrar la obra en operación. La experiencia en el Batolito Antioqueño indica que en estos suelos no ocurre el fenómeno mencionado.