

LA GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA VIAL: MÉTODOS DE ESTUDIO Y ENSAYOS DE APLICACIÓN SOBRE LOS MATERIALES PÉTREOS

Mauricio Berman*¹, Micaela Colavita¹, Hugo Bianchetto²

¹ Universidad Nacional de La Plata - Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Av. 122 y 60, (1900) La Plata, Argentina,

² Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Avellaneda (UTN-FRA), Ramón Franco 5050, (1874) Villa Domínico, Argentina

**Autor a quien se debe dirigir la correspondencia
mauricio_ber90@hotmail.com*

RESUMEN

La Tecnología, conjunto de conocimientos y técnicas aplicados a la resolución de problemas específicos, se encuentra en plena evolución y perfeccionamiento y cada vez más requiere de lo “multidisciplinario” para sus desarrollos, investigaciones e innovaciones. La construcción de estructuras novedosas, a menudo sofisticadas y complejas, con la necesidad de optimizar la economía, el cuidado del medio ambiente, la seguridad vial y el bienestar social, impone nuevas pautas de excelencia y eficiencia constructiva y operativa.

Estas aseveraciones no son ajenas a la práctica profesional del ingeniero civil, resultando a menudo necesario el aporte de otras especialidades para dar respuesta a las nuevas exigencias en los proyectos a ejecutar. Una de las disciplinas más afines a las obras civiles es la Geología, en particular lo referente a la Mineralogía y la producción de materiales rocosos.

El objetivo de este artículo es presentar, de forma sencilla y práctica, cuáles son los labores de un geólogo que son de directo interés para una de las ramas de la Ingeniería que más

consume estos materiales pétreos, la Ingeniería Vial, a fin entender los conceptos básicos y conocer las técnicas y métodos de análisis aplicables a los agregados componentes de hormigones, mezclas asfálticas y otros aglomerados artificiales.

Palabras Clave: agregados pétreos, obras viales, Geología Aplicada, análisis petrográfico

ABSTRACT

Technology is a set of knowledge and techniques applied to the resolution of specific problems that is in full evolution and improvement and that increasingly requires the “multi-disciplinary” for its developments, research and innovations. The construction of innovative structures, often sophisticated and complex, with the need to optimize the economy, care for the environment, road safety and social welfare imposes new standards of excellence and efficiency both constructive and operational.

These statements are not alien to the professional practice of the civil engineer, and the

contribution of other specialties is often necessary to provide to respond to new demands in the projects to be executed. One of the disciplines most related to civil works is Geology, particularly with respect to Mineralogy and the production of rock materials.

The aim of this article is to present, in a simple and practical way, which are the tasks of a geologist of direct interest for one of the branches

of Engineering that consumes these stone materials the most, the Road Engineering, in order to understand the basic concepts and know the techniques and analysis methods applicable to aggregates as components of concrete, asphalt mixtures and other artificial agglomerates.

Key words: stone aggregates, road works, Applied Geology, petrographic analysis.

INTRODUCCIÓN

La geología es la ciencia que estudia el planeta Tierra, su origen, formación y evolución, los elementos que lo componen y su estructura; especialmente, las rocas, los procesos que le dan origen y moldean su forma actual y, desde el interés del ingeniero civil, los productos o “materiales pétreos” que de ellas se pueden obtener.

En general, un geólogo no trabaja de forma aislada, sino que guarda estrecha relación con especialistas de otras ciencias y disciplinas. En este artículo se expone, en particular, de qué manera la Geología puede aportar conceptos y datos sumamente valiosos acerca de la utilización de las rocas en la Ingeniería Vial, desde el análisis de la zona de estudio hasta el detalle, clasificación y posibles usos de sus componentes, específicamente lo concerniente a su explotación y a la fabricación de los áridos pétreos para elaborar los materiales compuestos que integran las capas estructurales de los caminos (mezclas y otros aglomerados asfálticos; hormigones; estabilizados granulares, bituminosos, hidráulicos y químicos).

Identificada la cantera o yacimiento que proveerá el material necesario para una obra determinada, se pasa en una primera instancia a la búsqueda de información y bibliografía previa del área a examinar, basándose en cartas geológicas y publicaciones anteriores. Posteriormente, se confecciona un mapa propio con puntos de interés (trátase de estructuras o afloramientos), para así aprovechar al máximo el tiempo de las tareas a efectuar *in situ*.

Una vez reconocida la problemática y establecido el ámbito geográfico, se planea un viaje de campo, con el equipamiento de rigor y el equipo de trabajo que se requiera. A partir de aquí se comienza a operar a distintas escalas, desde lo más general hasta lo particular, como se detallará en este artículo.

A partir del asesoramiento geológico, el ingeniero puede definir qué sectores del yacimiento aprovechar, de qué manera extraer las rocas, cuál será el proceso de selección y/o trituración para la obtención de los agregados pétreos e, incluso, definir e interpretar ciertos ensayos y estudios de control de calidad.

A continuación, se brinda un panorama acerca de cuál es la función de la Geología en las obras viales, las metodologías de estudio y ensayo que se emplean y su importancia a la hora de decidir la selección de materiales pétreos. Además, se exhiben resultados de una aplicación directa de

un trabajo interdisciplinario entre ingenieros viales y geólogos, a partir del cual se pudo esclarecer una falla prematura en un pavimento asfáltico debido a ciertas particularidades de los áridos de tipo basáltico empleados.

PIEDRAS EN EL CAMINO

La estructura de un camino consiste en una serie de capas superpuestas aproximadamente horizontales, que van desde la denominada “subrasante”, que es la superficie terminada del movimiento de suelos, hasta la rasante o carpeta de rodamiento que constituye la cota superior. En todas ellas se utilizan materiales naturales derivados de las rocas y otros elementos minerales como las arenas, que representan la mayor parte de todos los materiales componentes de las obras viales.

En los caminos, carreteras y autopistas, la modalidad habitual de pavimento es el “flexible”, coronado en sus estratos superiores con mezclas y otros aglomerados cuyo ligante es el asfalto y su esqueleto interno se integra con material pulverulento (“filler”) y, muy especialmente, con agregados pétreos. Por ejemplo, en un “concreto asfáltico”, tipología más común para la capa de rodamiento, más del 90% en peso (y más del 80% en volumen) de todos los materiales son áridos pétreos. Y en las denominadas “bases negras”, capas que sirven de sustento a la anterior, tales proporciones son incluso superiores. En lo concerniente a pavimentos rígidos, los hormigones de cemento Portland contienen un 75% en peso de áridos entre agregados gruesos y arenas. También en los llamados “estabilizados granulares”, que son combinaciones de agregados y suelo utilizados en capas de subbases y bases, la mayor parte de sus componentes son áridos particulados de origen rocoso y arenas. En tanto que las capas de “pedraplenes” están conformadas en un 100% por partículas pétreas.

A pesar de estas cifras contundentes, paradójicamente los agregados pétreos suelen ser los materiales menos controlados, al punto que algunas canteras y yacimientos solamente se preocupan por determinar sus granulometrías (distribución de tamaños de partículas) y a lo sumo dos o tres parámetros exigidos por la industria vial, como el índice de lajas, sus caras de fractura y el coeficiente de desgaste superficial. Cuestiones fundamentales que hacen a la aptitud y a la durabilidad de estos materiales, como el análisis petrográfico (por ejemplo, para detectar fallas internas o presencia de minerales deletéreos) y la respuesta ante agentes agresivos, muchas veces no se tienen en cuenta y son causales de deterioros prematuros en los pavimentos, con consecuencias indeseadas respecto de su funcionalidad (tiempo de servicio; seguridad y confort del usuario), la economía de obra y el medio ambiente.

En la industria caminera, la naturaleza geológica de los agregados se da por sobreentendida según la región en la cual se localice la obra, limitándose su denominación comercial al constituyente principal de la roca de origen: “granito”, “cuarcita”, “basalto”, etc. Sin embargo, las propiedades mineralógicas de agregados de un mismo “tipo genérico” pueden variar drásticamente, incluso entre canteras de una misma región y ubicadas geográficamente próximas entre sí, influyendo de manera notoria en las propiedades que interesan para la conformación de mezclas asfálticas para pavimentación y de otros materiales compuestos.

Por tales motivos, el aporte de la Geología es trascendental para las obras viales.

LA FUNCIÓN DEL GEÓLOGO EN UNA OBRA VIAL

El trabajo del geólogo como parte del equipo de estudio y proyecto o inclusive de inspección o de construcción de una obra de caminos, consiste básicamente de cuatro etapas. La primera es “de tipo preparatorio”, en la cual se estudia la problemática a resolver, se consultan estudios previos, mapas y bibliografía y se lleva a cabo la planificación del trabajo a realizar. La segunda etapa es *in situ* o “de campo”, donde se efectúa un análisis de los frentes de canteras, se ejecutan perforaciones, mapeos de cuerpo y estudios geofísicos directos e indirectos y se realiza el muestreo (proceso y elección de muestras, conservación y clasificación, etiquetado, orientación). La tercera es “de laboratorio”, en la cual se llevan a cabo los exámenes químicos, petrográficos y físicos necesarios para completar el análisis de los materiales. Y la cuarta es “de gabinete”, en la que se relacionan los estudios de campo y de laboratorio, se evalúan resultados y se comprueban hipótesis. Los estudios que el geólogo cumple en las etapas segunda y tercera se pueden clasificar en tres escalas: megascópica, mesoscópica y microscópica.

Escala Megascópica

Mapeo: en una primera instancia se evalúa el área de trabajo, por ejemplo, un frente de cantera. Para ello, se recorre toda la zona, se hace un primer reconocimiento de la litología y se identifican áreas que llamen la atención, ya sea por mineralizaciones o cambios en las estructuras.

Se reconocen configuraciones geológicas tales como fallas, pliegues, cuerpos ígneos intrusivos, alteraciones, entre otras. Estas luego se representan en un gráfico ilustrativo (croquis) que incluye el área de estudio o zonas de interés, apuntando los datos más relevantes.

Las *fallas* (ver Figura 1), son planos de debilidad presentes en la roca a través de los cuales se produce el deslizamiento como consecuencia de un esfuerzo direccional. Según el tipo de esfuerzos que actúan, extensivos o compresivos y el movimiento que estos generan en el plano de falla se clasifican en normales (1a) o inversas (1b). En el campo se observan como una interrupción en el cuerpo rocoso representado por una línea (con roca molida y triturada llamada “jaboncillo”) a partir de la cual se produce el desplazamiento. Pueden encontrarse aisladas o en conjunto (1c).

Para fines prácticos, las fallas generan diversas complicaciones en el área de trabajo. En primera instancia, al ser planos de debilidad complican la extracción ya que deben tener un monitoreo constante o pueden generar serios derrumbes.

También puede suceder que a través de dicho plano se infiltre agua y produzca la alteración de la roca, lo que disminuye su cohesión y resistencia.

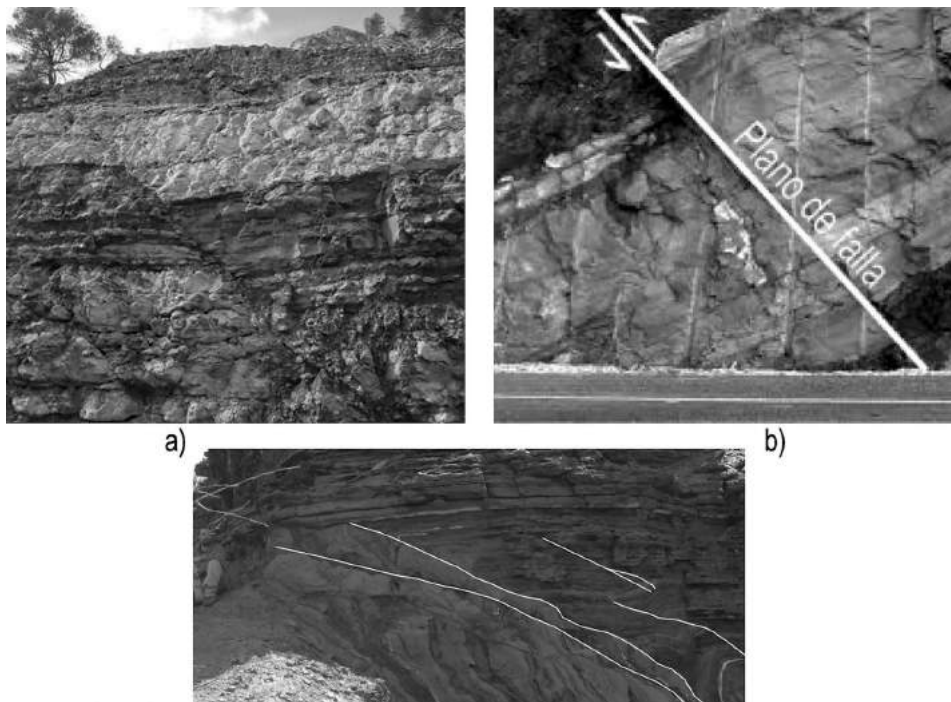


Figura 1: a) Falla de tipo normal, producto de un esfuerzo extensivo. b) Falla de tipo inversa, producto de un esfuerzo compresivo. c) Conjunto de fallas inversas afectando rocas sedimentarias, Cuesta de Miranda, La Rioja (Fotografías de los autores)

Los *pliegues* (ver Figura 2) son estructuras de diversas escalas, con magnitudes diversas, desde cientos de metros hasta algunos centímetros, generadas por esfuerzos compresivos continuos aplicados en los estratos rocosos durante largos periodos de tiempo (incluso millones de años) que acaban por curvarlos, produciendo formas tanto redondeadas como angulosas.

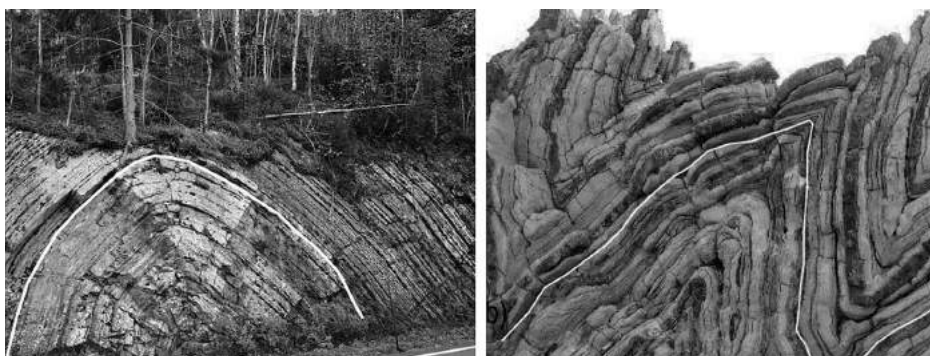


Figura 2: a) Pliegue anticlinal redondeado. b) Pliegues anticlinales angulosos de tipo “chevron”, Isla de Creta (<http://www.senderosdealicante.com>)

Si el área de trabajo se encuentra plegada se debe tener en consideración que los contactos entre estratos se encuentran debilitados por el esfuerzo compresivo, aumentando la probabilidad de un desmoronamiento. Asimismo, la distribución de la roca de interés se encuentra modificada, puesto que no es lineal como la estratificación original, y esto podría resultar en problemas a la hora de la extracción.

Los cuerpos ígneos intrusivos (Llambías *et al.*, 2012 y Toselli *et al.*, 2010), se clasifican según su morfología y forma de emplazamiento. Los *diques* (Figura 3) son columnas discordantes que atraviesan de forma perpendicular las estratificaciones ya formadas. Pueden abarcar desde centímetros hasta algunos kilómetros de ancho y cientos de largo. Suelen verse en los frentes de cantera, como columnas con una coloración diferente a la roca que lo rodea (roca de caja).



Figura 3: Diques de composición basáltica vistos en frente de cantera; Tandil, Provincia de Bs As. (Fotografías de los autores)

Los *filones capa* o *sills* (Figura 4), se originan a partir de un dique alimentador, el cual atraviesa la estratificación hasta que la densidad del magma iguala a la densidad de la roca de caja, momento a partir del cual empieza a desplazarse de forma horizontal ocupando parcialmente el lugar de los estratos hospedantes. Son de base plana y el techo puede estar englobado, dependiendo de la densidad del magma y la resistencia de la roca de caja. En casos como éste, el nombre cambia dependiendo del tipo de deformación (lopolitos, lacolitos, facolitos).



Figura 4: Filones capa de composición básica, con sus diques alimentadores, en frente de cantera (<http://www.uclm.es>)

El principal problema que conllevan los cuerpos ígneos se ve reflejado mayormente en los frentes de cantera. Es importante tener en cuenta que las propiedades físicas (tales como densidad, porosidad, resistencia, facilidad de alteración, etc.) varían con respecto a la roca de caja. A fines prácticos, este tipo de rocas presentarán un comportamiento diferente al esperado, por lo que es conveniente evitarlos o intentar minimizar la cantidad de material aportado en cada ciclo de acopio.

En cuanto a las *alteraciones*, se trata de cambios en la composición química de los minerales que conforman la roca, producto de desequilibrios respecto a las condiciones del ambiente en que se formaron (presión, temperatura, contenido de agua). Como resultado se obtiene una roca con comportamiento diferente al de la roca original.

Existen distintos tipos de alteraciones. Según Tarbuck *et al.* (2013), los mecanismos que regulan a estos procesos deletéreos son: la fragmentación mecánica y la alteración química; el primero es provocado por fuerzas físicas que causan rotura sin modificar la composición mineral de la roca; el segundo implica una transformación química de la misma en uno o más compuestos nuevos.

La alteración más común es la denominada “meteórica”, que se produce por la exposición de la roca a los elementos atmosféricos. Ejemplo de ella es la oxidación, mayormente del hierro, que genera una pátina rojiza sobre la superficie de la roca que, en el caso de los aglomerados asfálticos o hidráulicos, dificulta la adherencia con los ligantes. En la jerga vial, a las rocas graníticas alteradas o “meteorizadas” se los suele llamar “granitos podridos”.

Otro tipo de alteración es la “hidrotermal”, que se genera cuando la roca entra en contacto con aguas que están a altas temperaturas y que contienen minerales disueltos. Como producto de esta alteración los minerales se hidratan, se expanden y disminuyen la coherencia de la roca. Asimismo, se produce un intercambio de iones dando como resultado minerales totalmente nuevos, como sucede con la transformación de feldespatos a arcillas.

Existen estudios geofísicos que acompañan el trabajo de campo a la hora de mapear un cuerpo en profundidad, tales como los gravimétricos (para determinar cambios de densidad), sísmicos (estudian la transmisión de las ondas en las rocas en base al tiempo que tardan en regresar a la superficie) y geoelectrónicos (a partir de impulsos eléctricos y basándose en la conductividad y resistividad de la roca obtienen datos de la composición, porosidad y contenido de agua con sales disueltas), entre otros.

Muestreo: En una siguiente etapa se procede a la toma de muestras, las cuales deben ser auténticas y representativas del conjunto, así como de los lugares de interés particular.

Todas las muestras recolectadas deben ser frescas y no presentar alteración superficial (tales como óxidos y arcillas). Para lograr esto se fragmenta la roca original y se seleccionan los recortes pertenecientes al núcleo de la misma. Posteriormente se rotulan, indicando el techo y piso con respecto a la formación a la que pertenecen, en caso de que estén orientadas, y se les asigna un código particular (Cátedra Geología Económica FCNYM-UNLP, 2018).

Para su correcta conservación, cada muestra, o grupo de muestras que pertenezca al mismo cuerpo se coloca en una bolsa plástica de alta densidad, cuidando que no se contamine.

Las muestras se pueden extraer de diferentes maneras, dependiendo siempre del objetivo en el trabajo.

Primeramente, durante la exploración, se utilizan los métodos de *muestreo lineal*, útiles para reconocer la morfología del yacimiento. Dentro de ellos los más comunes se encuentran aquellos realizados mediante “canaletas” y “perforaciones”.

Para las *canaletas* se realiza una excavación previa en la zona de interés, y luego se cava una pequeña ranura en la pared de la misma; ésta debe tener una profundidad de 2 a 3 cm, debiendo aumentarse proporcionalmente con el tamaño de grano, un ancho máximo de 10 cm y una longitud variable, especificándose cuál corresponde a la parte superior en la muestra (techo).

Para las *perforaciones*, utilizadas con el fin de conocer la composición de la roca en profundidad, se utilizan principalmente dos técnicas: la perforación rotativa y la perforación por rotoperforación. La primera, mediante el uso de una corona de diamante o diamantina, permite recuperar un testigo (muestra representativa del pozo con forma cilíndrica, continua y de volumen constante, ver Figura 5) que brinda información geológica, geotécnica y mineralógica. Además, a partir de este espécimen se puede determinar un índice de recuperación RQD (Rock Quality Designation, sumatoria de todos los trozos con longitud mayor a 10 cm sobre la longitud del tramo perforado, por cien), que brinda datos sobre la resistencia y la calidad de la roca. La segunda, mediante el uso de brocas con inclusiones de carburo de tungsteno permite, con un movimiento alternado de giro y golpe, obtener un material disgregado que es extraído mediante la circulación de un fluido que puede ser aire, agua, o barro, y que brinda información mineralógica y composicional.

Una vez determinado el tipo de yacimiento sigue una etapa de prospección donde se realiza la evaluación del mismo con el fin de encontrar las áreas que provean la mayor cantidad de material con la mayor calidad posible. En esta etapa de escala megascópica se realiza un *muestreo puntual* donde se toman muestras de mano, que brindan datos texturales y mineralógicos y que serán analizadas con detalle en menor escala.

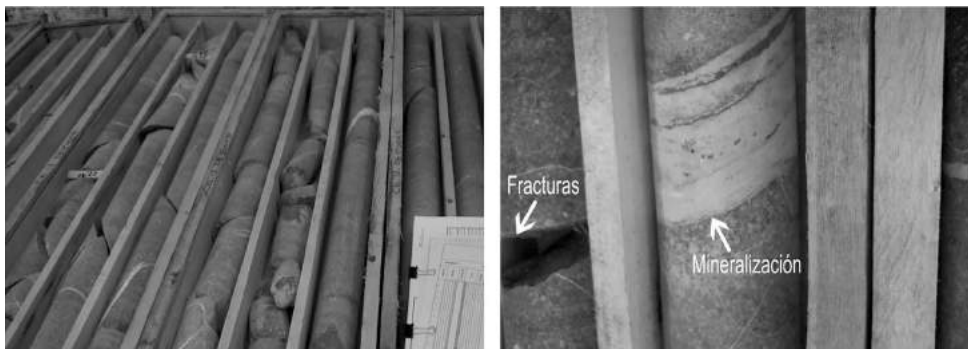


Figura 5: Testigos coronas obtenidos a partir de una perforación rotativa. En la figura de la izquierda se puede observar con detalle la mineralización y las fracturas presentes en el cuerpo rocoso que resultan en la fragmentación del testigo (Fotografías de los autores)

Escala Mesoscópica:

Una vez realizado el trabajo de campo y adquiridas las muestras de mano, se lleva a cabo un análisis más meticuloso.

Primeramente, se observa la roca y se la clasifica en ígnea, sedimentaria o metamórfica, según su génesis (Figura 6). Dependiendo del tipo de roca, se decidirán los análisis que se llevarán a cabo posteriormente.

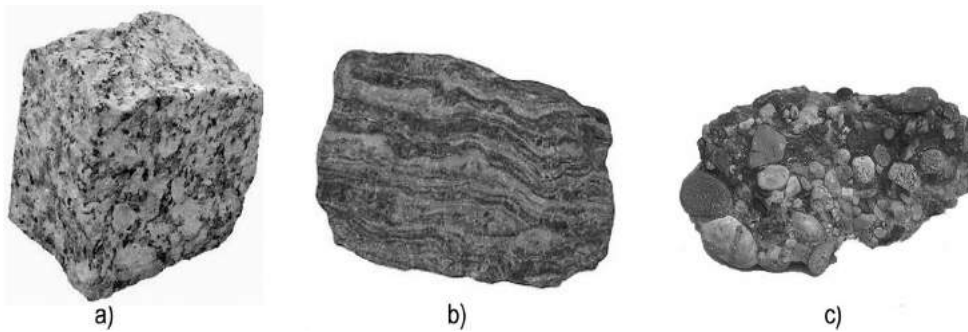


Figura 6: a) Roca ígnea, granito. b) Roca metamórfica, gneis. c) Roca sedimentaria, conglomerado. (Fotografías de los autores)

Se ejemplifica con la descripción de una roca ígnea, ya que representa la gran mayoría de las utilizadas en la ingeniería (Cátedra Petrología de Rocas Ígneas FCNYM-UNLP, 2018).

Para comenzar, se determina el tamaño de grano de los minerales que componen la roca, y de esta forma se las diferencia en plutónicas (grano grueso a fino, constituidas únicamente por cristales) y volcánicas (grano fino a microscópico, constituidas por cristales y pasta).

Luego, con la ayuda de una lupa, se analizan los cristales identificando a qué mineral corresponden. Acto seguido, se reconocen las texturas presentes (relaciones entre cristales) y se intenta determinar el grado y tipo de alteración de la roca. Con todos estos datos se la clasifica con un sistema de nomenclatura preestablecido, basado en la proporción de minerales mayoritarios que la componen (Feldespatos alcalinos, Cuarzo, Plagioclasas, y Feldespatoides) por medio de dos diagramas ternarios (ver Figura 7; <http://www.geologyin.com>).

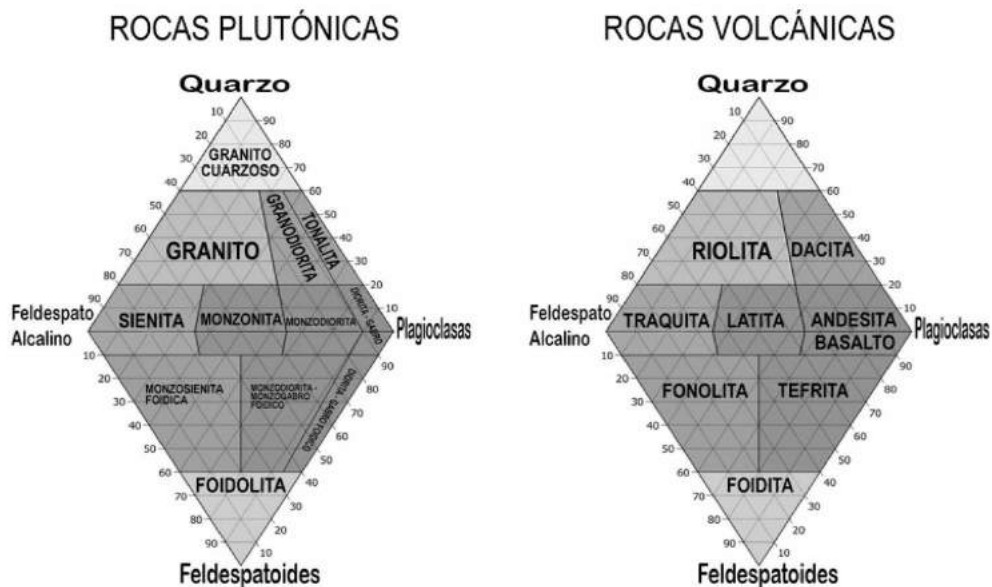


Figura 7: Gráfico QAPF para la clasificación modal de rocas ígneas (<http://www.geologyin.com>)

En el caso particular de las rocas sedimentarias se utiliza otro tipo de clasificación, pues se toman en cuenta otros parámetros, como pueden ser: el tamaño de grano (lutita, arenisca y conglomerado), la génesis, y la cantidad de materia orgánica (ver Figura 8; ALLPE 2013).

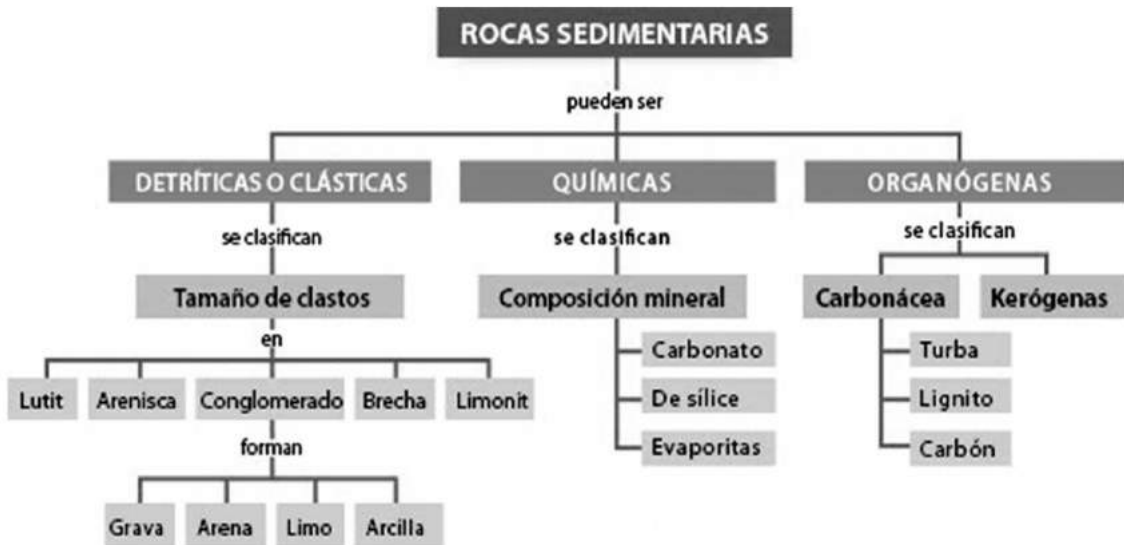


Figura 8: gráfico ilustrativo para la clasificación de rocas sedimentarias (ALLPE 2013; <https://www.pinterest.com/>)

En cuanto a las rocas metamórficas, se clasifican a partir de la roca original de la que provienen y el grado de transformación de la misma por cambios en la temperatura, presión y cantidad de agua, sostenidos en el tiempo. Parte de esta transformación involucra al reordenamiento y recristalización de los minerales presentes. Es importante resaltar este hecho, ya que al reordenarse los minerales producen un fenómeno llamado *foliación*; esto quiere decir que se orientan de forma paralela generando planos de debilidad y como consecuencia presentan luego una menor resistencia a esfuerzos direccionales (Figura 9).

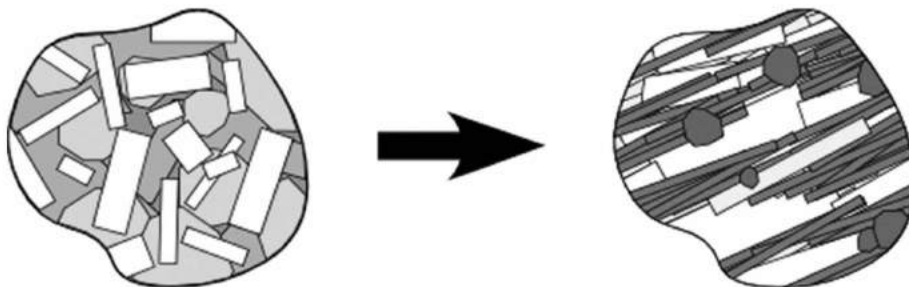


Figura 9: Representación del cambio en la orientación de los cristales producto de la presión en el metamorfismo de una roca (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), 2017)

Escala microscópica:

Seleccionando una sección en particular de la muestra, se realiza un corte de la roca de interés que consta de una lámina delgada de 30 micrones de espesor y unos pocos centímetros cuadrados de superficie, unido a un portaobjeto mediante un bálsamo o resina, para observar en un microscopio especializado con luz polarizada plana (Kerr, 1989). Esta luz permite identificar los minerales, ya que al atravesar el corte resalta distintas propiedades que los diferencian entre sí, ya sea clivaje, color de interferencia, pleocroísmo (cambios de color según la polarización de la luz incidente), relieve, entre otras. Además, adicionando un filtro analizador que genera luz polarizada cruzada, se identifica un color de interferencia característico para cada mineral.

Con el análisis detallado de estos cortes se logra obtener, además, información importante para la futura aplicación de la roca, ya sea acerca de la presencia de *zonaciones* minerales (evidencia de cambios en las condiciones de cristalización), alteraciones específicas y presencia de minerales hidratables que disminuyen la coherencia de la roca volviéndola frágil o poco estable a largo plazo (Bianchetto *et al.*, 2017). Asimismo, es posible reconocer orientaciones preferenciales y microfracturas que podrían resultar en planos de debilidad (Figura 10).

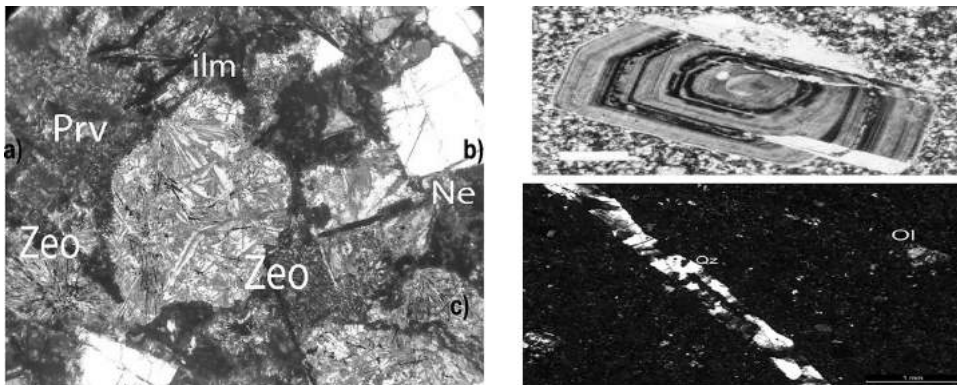


Figura 10, vista al microscopio. a) roca alcalina con minerales hidratables expansivos zeolitas (Zeo) y oxidables ilmenita (ilm) y perovskita (Prv). b) zonación en una plagioclasa. c) microfractura rellena de cuarzo (Bianchetto *et al.*, 2017)

UN CASO DE APLICACIÓN: ESTUDIO DE FALLAS PREMATURAS EN PAVIMENTO ASFÁLTICO ELABORADO CON AGREGADOS DE TIPO BASÁLTICO

Se trata de una carpeta asfáltica de una ruta en la cual se detectaron deterioros prematuros superficiales. Se dispuso de la documentación provista por el comitente, informes técnicos varios producidos o bien solicitados por la empresa y se efectuó una visita a la obra para verificar las fallas aparecidas. La fotografía de la Figura 11 muestra una falla típica en el tramo, con fisuras entramadas con afloramiento de material pulverulento.



Figura 11. Fisuras entrelazadas en pavimento asfáltico, con afloramiento de material pulverulento (Fotografía de los autores)

Los agregados pétreos empleados, tanto gruesos como finos, fueron “de tipo basáltico”, extraídos de canteras de una zona próxima. Los ensayos que se realizaron sobre estos materiales pétreos durante las etapas previas y durante la construcción del tramo fueron los convencionales que habitualmente se practican.

En la fracción gruesa de estos áridos de tipo basáltico es conveniente, previo a su utilización, la realización de estudios y ensayos complementarios no rutinarios relacionados con la composición mineralógica de este tipo de agregados y a ciertos causales que originan una inestabilidad de los mismos. En ciertos casos particulares estos estudios pueden poner en evidencia la posibilidad de fallas potenciales que los ensayos contemplados en la mayoría de las especificaciones técnicas no lo hacen. Estas mediciones no rutinarias, entendiéndose por tales las no indicadas en los pliegos o las que, aun estando prescritas, no suelen practicarse, constituyen una herramienta necesaria al momento de determinar la elección de la cantera o yacimiento y la viabilidad técnica de empleo de agregados de esta naturaleza, fundamentalmente considerando ciertos antecedentes negativos al respecto. Por caso, cuando se trata de basaltos es menester determinar si existen dentro de sus componentes sustancias del tipo filosilicato (minerales arcillosos) o bien, para el caso de las mezclas en caliente, si se manifiesta el denominado “Efecto Sonnenbrand”, que se evalúa en laboratorio mediante un ensayo de ebullición (Norma UNE-EN 1367-3, 2001), el cual revela esta patología.

El efecto “Sonnenbrand” (en alemán: “quemadura por el sol”) es un tipo de alteración superficial que pueden presentar algunos materiales de tipo basáltico y que aparece por influencia de las condiciones meteorológicas. El fenómeno comienza con la aparición de manchas en forma de estrella color blanquizco, posiblemente de sulfatos o carbonatos metálicos, produciéndose grietas capilares internas que se entrelazan, reduciendo el tejido mineral y, en un estadio severo, desintegrando la roca en partículas pequeñas. Algunos autores, como Weiher et al. (2007) indican que el efecto Sonnenbrand se manifiesta con emanaciones blanquizcas, aunque también reportan presencia de zeolitas (aluminio-silicatos muy porosos), de óxidos de hierro y titanio y de minerales ferromagnesianos que experimentan desequilibrios en presencia de agua, expandiéndose y debilitando internamente la roca. Por otro lado, pero probablemente relacionado con lo antedicho, se han observado problemas de adherencia árido-ligante impropios de agregados de tipo básico como los basaltos; es posible que la aparición de las ya mencionadas manchas en forma de estrellas gris/blanco y de una especie de oxidación superficial haya dificultado su adherencia con el asfalto.

Los basaltos son rocas volcánicas aptas para producir agregados pétreos para mezclas asfálticas. De color oscuro, grano fino, gran dureza y peso específico relativamente elevado, poseen propiedades diversas según su composición y su grado de exposición a los agentes atmosféricos, aún en regiones geográficamente próximas y con similar conformación geológica. Proviene de las rocas volcánicas extrusivas, formadas cuando el magma hace erupción y fluye hacia la superficie en forma de lava que se enfría, en general con rapidez, lo que explica sus granos finos. Sus componentes principales son plagioclasas (feldespatos, aluminosilicatos cálcico-sódicos), minerales máficos como olivinas, anfíboles y piroxenos (silicatos ricos en hierro y magnesio) y óxidos de hierro, además de otros minerales accesorios y vidrio volcánico.

Muchas obras de ingeniería se han visto perjudicadas por el uso de áridos inapropiados, cuyos peligros se ignoraban por no haberse realizado ni los ensayos necesarios ni un análisis petrográfico previo a su selección. En el caso de los pavimentos bituminosos ejecutados con agregados basálticos, se han encontrado ciertos deterioros atribuibles a particularidades constitutivas de dichos áridos pétreos y cuyas consecuencias son en general desconocidas por los tecnólogos del asfalto y que no fueron tomadas debidamente en cuenta en el pliego de especificaciones técnicas generales y particulares del caso que se expone.

La casuística reportada bibliográficamente en referencia al efecto Sonnenbrand en pavimentos asfálticos no es muy profusa. De todos modos, hay algunos antecedentes que ilustran las causas y las consecuencias de este fenómeno.

Zagozdzon (2003), estudiando rocas basálticas del terciario en Polonia, encuentra manifestaciones de este efecto en rocas basálticas, cuya característica diagnóstica son las grietas capilares y las manchas (“spots”) tridimensionales isométricas causadas por meteorización física y originadas por procesos magmáticos tardíos y la cristalización no uniforme de feldespatoides (como las nefelinas). Figura 12. En este caso, la manifestación se da en la misma roca de origen, la cual debe ser desechada para su empleo en pavimentación.

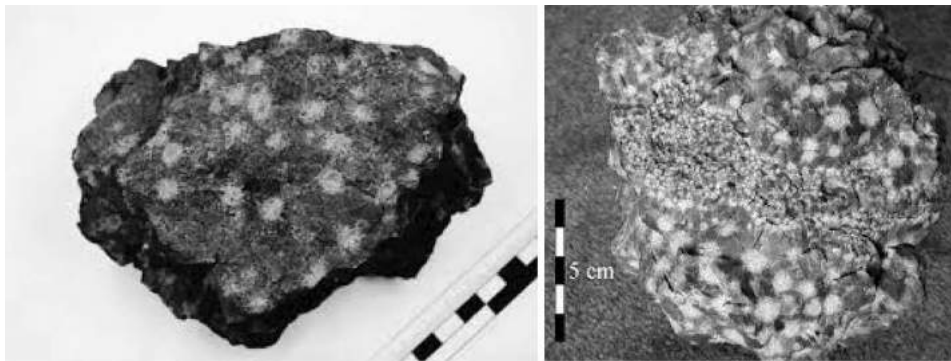


Figura 12. Aspecto de rocas con “Sonnenbrand” (Zagozdzon, 2003)

En el manual “Highway Engineering: Pavements, Materials and Control of Quality” (Nikolaides, 2014), se menciona el efecto Sonnenbrand puntualizándose que “comienza con la aparición de un moteado o manchas estrelladas de color blancuzco-grisáceo, generando usualmente fisuras capilares que reducen la resistencia de los minerales”, desintegrándose los agregados y dañando en consecuencia a la calzada bituminosa.

Martinho *et al.* (2018) destacan que el Sonnenbrand Test se incluye en las especificaciones portuguesas para mezclas asfálticas elaboradas con agregados naturales.

En el Reino Unido, donde las condiciones climáticas, en particular las temperaturas y las radiaciones solares, no propenden a la generación de efecto Sonnenbrand, se ha reportado sin embargo un caso de agregados triturados provenientes de una roca ígnea básica, utilizados como subbase, que reaccionaron con el aire y el agua, probablemente durante el verano, ocasionando la descomposición de las partículas pétreas.

Es factible pensar que los drásticos cambios que se ocasionan al fragmentar las rocas hasta tamaños muy inferiores a los originales para formar agregados triturados, por voladura en el frente de cantera y posterior machaqueo en las plantas de trituración, pueden originar una meteorización acelerada durante dichos procesos, que continúa luego en los acopios del obrador y durante la elaboración de mezcla en la usina asfáltica, la ejecución de la obra y a lo largo de la vida en servicio del pavimento. Algunos autores han advertido sobre problemas asociados con la presencia de estructuras con espaciamiento inter-laminar de los cristales que componen los agregados pétreos que afectan la durabilidad y estabilidad de las mezclas asfálticas, originando deficiencias en la adherencia árido-ligante y micro-fisuración de agregados (Beltrán, 2011; Agamalian *et al.*, 2002). En particular, los basaltos sufren procesos de descomposición y en tal condición son débiles e inestables (Montero, 2003).

Los filosilicatos (arcillas de tipo illita, montmorillonita y vermiculita, entre otros minerales) presentan una considerable avidéz de agua que obedece a sus características físicas y químicas (aunque también las micas y las biotitas presentan cierta potencialidad física para el ingreso de agua debido a su estructura laminar), situación ésta que puede dar origen durante la vida en servicio de los concretos asfálticos a dos causas de falla las cuales generalmente se producen de manera simultánea:

Problemas de adherencia del sistema árido-ligante asfático

La existencia de filosilicatos dificulta el proceso de secado de los agregados durante la elaboración de la mezcla asfáltica. Si el secado no es correcto, la presencia de agua en los agregados

originará en problemas de adherencia árido-ligante que terminarán con el tiempo provocando desprendimientos superficiales.

Microfisuraciones y fisuras superficiales

Los componentes del tipo filosilicatos en presencia de agua verifican incremento de volumen (hinchamiento) que originan tensiones de tracción; estos esfuerzos conducen a la generación de microfisuras. Por estas microfisuras ingresa agua y coadyuvado con la repetición de cargas las mismas se unen y propagan produciendo un agrietamiento visible; posteriormente el sistema se retroalimenta incrementando los problemas originados por las reacciones que el agregado puede manifestar con la presencia de agua a lo cual se suma la potencial falla del sistema árido-ligante.

Dentro de los antecedentes de la obra se contó con estudios enviados a realizar por el comitente que verifican la presencia eventual de este tipo de componentes en los agregados empleados. Uno de ellos indica que hay fragmentos de roca con principio de meteorización, visible en los poros dejados por la alteración de algunos granos minerales, muchos de los cuales están rellenos con óxidos de hierro y cantidades no significativas de fragmentos con pátinas carbonáticas y otros con venillas de sílice. También se observa una marcada presencia de material fino y polvo suelto, donde se detectan, mediante Difractometría de Rayos X, ciertos compuestos cuyos componentes principales son minerales del grupo piroxenos, plagioclasa, biotita y que, además, presentan componentes accesorios como calcita, hematita, feldespato potásico y dentro del grupo de los filosilicatos, cloritas, micas y arcillas del grupo de las esmectitas. En este aspecto, la sola existencia de estos componentes resulta más relevante que las cantidades relativas de los mismos.

La aparición de fisuras originadas por desprendimientos superficiales sería compatible con reacciones ocasionadas por hinchamientos vinculados a la presencia de componentes reactivos dentro del agregado pétreo en los agregados en presencia de agua y/o por efecto Sonnenbrand, tal cual lo muestran ensayos petrográficos *ad hoc* y estudios realizados por otros investigadores con los áridos de la zona. El deterioro se profundiza y acelera una vez originados los primeros desprendimientos (facilidad al ingreso de agua) luego de la existencia de periodos de lluvia.

Poklepovic y Silva (2012) alertan sobre un “proceso de deterioro conocido como efecto Sonnenbrand, observado en algunos basaltos alcalinos de la provincia de Córdoba (Argentina)”, describiendo la aparición de las manchas blanquecinas a partir de las cuales se generan grietas que provocan la desintegración de los agregados y que causan la falla prematura del pavimento, en un período de entre 6 y 24 meses después de su construcción. Ilustran que tal manifestación se da en basaltos con composiciones alcalinas y portadores de nefelina y analcima. El trabajo señala la necesidad de contar -a nivel nacional- con un procedimiento de ensayo que permita evidenciar estos problemas.

Bianchetto *et al.* (2017, op. cit.) estudiaron, precisamente, los áridos “de tipo basáltico” de las sierras de Córdoba y San Luis, en Argentina, en cercanías de la obra en cuestión y lugar de las canteras de aprovisionamiento para la misma, y concluyeron que tales agregados pétreos no son “basaltos” sino que mineralógicamente pertenecen a otro tipo de roca volcánica, respondiendo a la clasificación de “foiditas” o “nefelinitas olivínicas” (ver Figura 7). Y, lo más importante, evidenciaron pérdidas diferenciales por desgaste en el ensayo de Los Ángeles después de someter los áridos al ensayo Sonnenbrand y observaron la aparición de manchas blancuzcas y también de óxidos de hierro en la superficie de algunas partículas después del período de ebullición. Los minerales de carácter alcalino (piroxeno, nefelina y zeolita) tienden a reaccionar, deduciéndose que una alteración de los mismos puede haber generado liberación de carbonatos de sodio durante el ensayo,

ocasionando una debilidad atribuible al efecto Sonnenbrand; fotografía “a” de la Figura 13. A modo ilustrativo, en la fotografía “b” de la Figura 13, se exhibe un corte de roca basáltica con alteración Sonnenbrand (Weiher *et al.*, 2007, *op. cit.*)

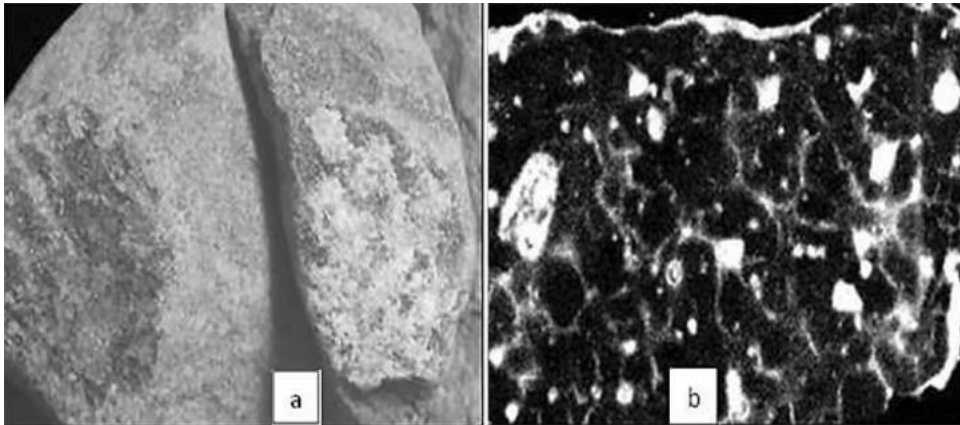


Figura 13. a: liberación de carbonatos (posible efecto Sonnenbrand) y de óxidos de hierro en foiditas de Córdoba/San Luis (Bianchetto *et al.*, 2017); b: corte de muestra de basalto con avanzada alteración Sonnenbrand (Weiher *et al.*, 2007)

En síntesis, el aporte de los estudios petrográficos y la ejecución de ensayos no tradicionales permitieron inferir las causas de las fallas prematuras y dejar sentado un antecedente valioso acerca de cómo proceder para el estudio de agregados potencialmente inestables como los de tipo basáltico y decidir si deben o no utilizarse en las mezclas asfálticas, destacándose la importancia de la Geología como disciplina interactuante en las obras de carreteras. En el ejemplo, se comprobó que los agregados que se emplearon para la construcción de la obra estudiada provocaron las fallas prematuras en el pavimento y que no debieron ser aprobados.

Casos como el expuesto motivaron que, en las nuevas Especificaciones Técnicas de la Dirección Nacional de Vialidad de Argentina de 2017, se puntualice la necesidad de efectuar análisis específicos sobre las rocas de origen de los agregados y, en particular, se prescriban requisitos especiales sobre los materiales “de tipo basáltico”, aunque sigue adoleciéndose de falta de información acerca de lo que significa tal expresión encomillada, induciendo a la comunidad tecnológica vial a continuar confundiendo a las foiditas de Córdoba y San Luis con basaltos, a pesar de poseer características diferenciales relevantes.

CONCLUSIONES

Los agregados pétreos son materiales primordiales de las obras de caminos, siendo no sólo los más cuantiosos sino además tecnológicamente indispensables. De ahí su importancia ingenieril y económica en los proyectos viales. Por ser de origen natural, su uso racional reviste además relevancia medioambiental.

El conocimiento de sus propiedades específicas, de sus beneficios y limitaciones, permitirá construir obras mejores técnicamente, más durables y de menor costo. Por tales motivos, resulta imprescindible la asistencia de un geólogo a la hora de seleccionar las fuentes de provisión y de

definir estudios y ensayos para los controles de calidad, incorporando a la industria vial conceptos y técnicas poco dominados por los ingenieros civiles, las cuales se explican someramente en este trabajo.

El caso de aplicación presentado ejemplifica de qué manera la práctica profesional de un geólogo posibilita la selección de los agregados pétreos apropiados para una obra determinada a fin de asegurar su funcionalidad y su vida de servicio prevista.

REFERENCIAS

AGAMALIAN, M.; IOLIN, H.; KAISER, C.; REHM, S. "A new dynamical diffraction-based technique of residual stress measurements in thin films". Applied Physics A, Materials Science & Processing. Vol. 74, Issue 1 Supplement. ISSN: 0947-8396 (print version), 2002.

ALLPE. Empresa de Medio Ambiente, Acústica, Topografía e Ingeniería en la Comunidad de Madrid. (2013, de junio), [en línea]. Disponible en: <https://www.pinterest.com/allpe/geologia/>. [Fecha de acceso: 4 de mayo de 2018].

BELTRÁN, G. "Técnicas de microscopía y petrografía para caracterizar materiales de carreteras". The 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference. Toronto, Canadá, 2011.

BIANCHETTO, H.; BERMAN, M.; BIANCHETTO, E.; SOENGAS, C.; REBOLLO, R.; OTERO, S. "Áridos basálticos en mezclas bituminosas: propiedades, riesgos potenciales y necesidad de incorporar el análisis geológico a su caracterización vial". XIX Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto (CILA), Medellín, Colombia, 2017.

Cátedra "Geología Económica", FCNYM-UNLP, Apunte de Cátedra. La Plata, Argentina 2018.

Cátedra "Petrología de Rocas Ígneas", FCNYM-UNLP, Apunte de Cátedra. La Plata, Argentina 2018.

Geology In. (2015, octubre), [en línea]. Disponible en: <http://www.geologyin.com/2015/08/using-qapf-diagram-to-classify-igneous.html>. [Fecha de acceso: 4 de mayo de 2018].

KERR, P. F. "Manual de Mineralogía Óptica", tomo 1, Cap. 2, "El microscopio polarizante". Ed. Del Castillo, 3ra. Edición, Madrid, 1989.

LLAMBIAS, E. "Geología de los cuerpos Ígneos". Cap. 6 "Cuerpos ígneos laminares". CONICET. Buenos Aires, Argentina, 2012.

MARTINHO, F., PICADO-SANTOS, G., CAPITÃO, S. "Feasibility Assessment of the Use of Recycled Aggregates for Asphalt Mixtures". Sustainability (2018, 25 de mayo), [en línea]. Basilea, Suiza. Disponible en: <http://www.mdpi.com/2071-1050/10/6/1737/pdf>, [Fecha de acceso: 20 de julio de 2018].

MONTERO, J. "Las Rocas" (2003), [en línea]. Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Disponible en: <http://www.docentes.unal.edu.co/jmmonteroo/docs>. [Fecha de acceso: 3 de junio de 2017].

NIKOLAIDES, A. "Highway Engineering: Pavements, Materials and Control of Quality", Ed. CRC Press, EE. UU., 2014.

[Norma UNE-EN 1367-3 “Ensayos para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos. Parte 3: ensayo de ebullición para los basaltos “Sonnenbrand”. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid, España, 2001.

POKLEPOVIC, F. y SILVA, R. “Aplicación del ensayo de “Sonnenbrand” a las rocas basálticas: Propuesta de estudio para su normalización en el ámbito nacional”. 16º Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, Córdoba, Argentina, 2012.

Senderos Geológicos. Guía de lugares de interés geológico de la Provincia de Alicante (2010), [en línea]. Alicante, España; Diputación de Alicante, Área de Medio Ambiente. Disponible en: <http://www.senderosdealicante.com/geologicos/lugares/riublanc.html> [Fecha de acceso: 4 de mayo de 2018].

TARBUCK, E.; LUTGENS, F. “Ciencias de la Tierra. Una introducción a la Geología Física”. Cap. 6, “Meteorización y Suelo”. Ed. Pearson, Madrid, España, 2013.

TOSELLI, M. “Elementos básicos de la petrología Ígnea”. Cap. 5, “Cuerpos intrusivos”. Ed. INSU-GEO, Tucumán, Argentina, 2010.

Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Petrología y Geoquímica, España (2014, 14 de junio). Atlas de Rocas Ígneas [en línea]. Disponible en: <http://www.uclm.es>. [Fecha de acceso: 4 de mayo de 2018].

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), España (2017, 5 de noviembre). Rocas Metamórficas. Descripción de los procesos metamórficos y sus ambientes, Apuntes de Geología, [en línea]. Disponible en: <https://www.doccity.com/es/rocas-metamorficas-descripcion-de-los-procesos-metamorficos-y-sus-ambientes/2273262/>. [Fecha de acceso: 4 de mayo de 2018]

WEIHER, B.; LEHRBERGER, G.; Thuro, K. Prüftechnischer Nachweis von Sonnenbrand an einem Basalt der Oberpfalz (2007) [en línea]. Bochum, Alemania: 16. Tagung für Ingenieurgeologie und Forum “Junge Ingenieurgeologen”. Disponible en: www.geo.tum.de/people/thuro/pubs/2007_tag_ing_16_basalt.pdf. [Fecha de acceso: 3 de junio de 2017].

ZAGOZDZON, P. “Sunburn in the Tertiary Basalts of Silesia (SW Poland)”. Geoline - Papers in Earth Sciences, Institute of Geology, Academy of Sciences, Praga, Rep. Checa, 2003.