

Estudio de la Degradación de los Agregados Pétreos durante la Vida Util de los Pavimentos

Día a día se está cuestionando sobre la permanencia de las condiciones que presentan los materiales empleados para la construcción de obras civiles; esto resulta aun más complejo cuando se trata de materiales naturales, no tratados, provenientes de la corteza terrestre.

Siempre se parte de una supuesta actividad o estabilidad de los agregados, los cuales son calificados como "inertes"; ahora se acepta plenamente que su comportamiento está lejos de tal condición y más bien encaja dentro del concepto de una acción dinámica que puede ser acelerada o atenuada en los procesos de producción y construcción y durante la vida de servicio.

En el presente trabajo se analizan, someramente, los factores incidentes en la resistencia a la degradación que presentan los agregados pétreos y se hace una revisión sobre las evaluaciones que se realizan para tratar de predecir la durabilidad de los mismos y la permanencia de sus características con el tiempo.

Bajo la denominación "degradación" se contemplan los procesos mecánicos y químicos que producen una reducción de rango y condición de los agregados. Los procesos mecánicos dan lugar a la desintegración de los agregados y los procesos químicos a una descomposición de algunos de los constituyentes minerales primarios.

La degradación es un proceso dinámico de intensidad creciente y variable, modificada por las condiciones imperantes y/o tratamientos aplicados, que afecta sensiblemente las condiciones de servicio de los agregados y, por consiguiente, una reducción en la vida de servicio de las obras y un cambio en las propiedades fundamentales como son: la resistencia, deformabilidad, flexibilidad, permeabilidad, etc. Muchos son los factores asociados con la degradación de los agregados, algunos de los cuales se presentan en la Figura N° 1 y cuya incidencia es analizada en los párrafos siguientes.

JORGE TAMAYO TAMAYO

Ingeniero Civil, M.G.

Profesor Asociado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

CARLOS GUTIERREZ GUEVARA

Ingeniero Civil

Profesor Asistente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

JORGE CABRERA VARGAS

Ingeniero Civil

Profesor Asistente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

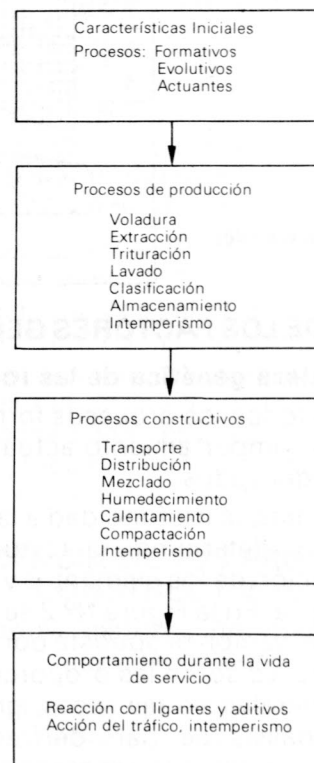


FIGURA 1. Factores asociados con la resistencia a la degradación de los agregados.

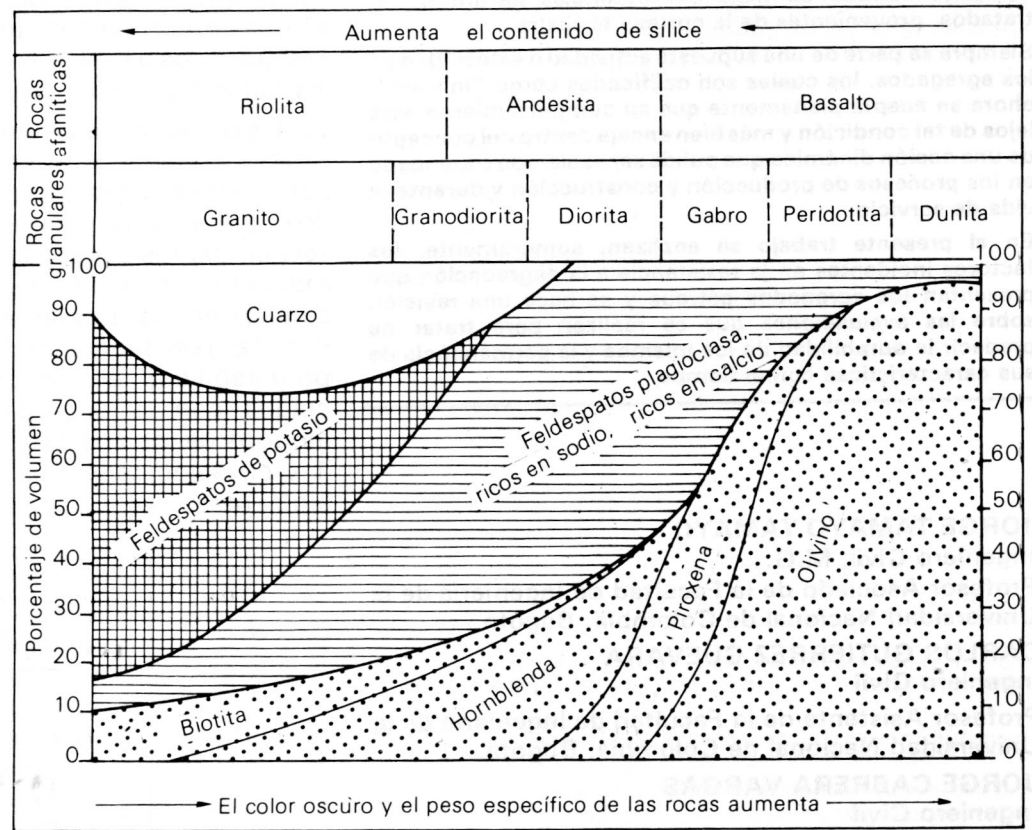


FIGURA 2. Serie de reacción de Bowen.

INCIDENCIA DE LOS FACTORES GEOLOGICOS

Naturaleza genética de las rocas

Es el reflejo de todos los procesos formativos que condicionan el comportamiento actual y futuro de los agregados derivados.

En las rocas ígneas, la profundidad a la que ocurre la cristalización, determina: la textura, tamaño, forma y disposición de los elementos y la composición mineralógica. En la Figura Nº 2 se muestran la escala de cristalización propuesta por Bowen y un diagrama ilustrativo sobre las proporciones de los principales minerales en las rocas ígneas comunes; de su análisis se han derivado algunas conclusiones referidas a la resistencia a la degradación, la cual se ve fortalecida con la menor temperatura de cristalización y el mayor contenido

de sílice.

En las rocas sedimentarias el comportamiento frente a la degradación está en función de: la naturaleza de los componentes, del mecanismo de formación y de la cantidad y calidad del cementante; esto último en cuanto a las rocas clásticas y para las no clásticas la predominancia de los carbonatos de calcio o magnesio, el grado de pureza y el nivel de consolidación.

El comportamiento de las rocas metamórficas está asociado con: la presencia de esquistosidades y de algunos elementos como sulfuros y micas, la naturaleza de los componentes primarios y la intensidad de los fenómenos formativos actuantes.

Factores estructurales

Los factores estructurales pueden llevar a propi-

ciar o neutralizar la alteración de las propiedades iniciales de las rocas; entre estos factores se deben considerar: la continuidad de la masa rocosa, las disconformidades, pliegues y diaclasas.

Otros factores, tan fundamentales como los anteriores, están ligados con la expeditividad para su empleo como fuente de agregados; homogeneidad, características del afloramiento, espesor de la cobertura y presencia de agua; unos en forma directa y otros con menor incidencia, todos afectan la resistencia de la roca frente a la degradación.

Alteración por intemperismo

Está asociada inseparablemente con las condiciones ambientales imperantes, se manifiesta en térmicos de oxidación, hidratación y remoción de componentes; es un proceso dinámico intenso en donde ocurre la transformación de algunos de los minerales existentes y la formación de otros productos, lo cual lleva consigo, invariablemente, la degradación de la roca. La transformación de los minerales primarios y la producción de otros está en función de las características iniciales y de las circunstancias en que se produce la alteración. En la Figura N° 3a se relacionan algunos de los minerales secundarios, producto de la alteración de minerales primarios.

Un aspecto significativo de la alteración es el hecho que sobre un mismo material, sometido a diferentes procesos degradacionales, da lugar a diferentes productos y, por consiguiente, incide en forma diversa sobre la durabilidad.

En términos amplios se puede decir que la alteración química afecta principalmente a las rocas ígneas, que extrañan su medio de formación

y no logran aclimatarse al actual; las sedimentarias nacieron con las condiciones hoy prevalecientes y por ello su alteración es más eventual, las metamórficas presentan facetas intermedias.

Es necesario identificar el grado de alteración química e inicial y su posible desarrollo durante la vida útil de las estructuras en donde se empleen las rocas como fuente de agregados; para ello se requiere ejecutar un examen petrográfico detallado, pruebas de laboratorio y una calificación inicial de la resistencia a la degradación, basada en investigaciones previas, tal como la que se muestra en la Figura 3b., realizada por Carroll sobre el índice potencial de meteorización.

La alteración mecánica producida por descompresión o cambios volumétricos, causada por acciones naturales o antrópicas, está actuando en conjunción con la alteración química, derivándose en ocasiones una de otra; es más fácil de caracterizar y las pruebas actuales de laboratorio están orientadas hacia ella.

INCIDENCIA DE LOS PROCESOS DE PRODUCCION

1. Voladura, extracción, trituración

Estos procesos dan lugar a un material debilitado por los esfuerzos aplicados, de menor tamaño, de formas variables, con mayor superficie de exposición, heterogéneo y contaminado; queda, de esta manera, un producto en condiciones precarias para seguir afrontando los procesos degradacionales actuantes y los causados por los agentes que empiezan a aparecer.

2. Lavado, clasificación, transporte y almacenamiento

Su incidencia es menor que los anteriores procesos, pero implica nuevas acciones: pérdida de finos, humedecimiento-secado, desgaste por atricción, segregación y exposición directa.

3. Intemperismo durante los procesos de producción

Al incrementarse la superficie específica del material y debilitarse la resistencia de los materiales por los esfuerzos inducidos, se propician condiciones desfavorables frente a los agentes del intemperismo actuantes y a los que entran en acción; la afectación será en primera instancia gradual e irá profundizándose cada vez más, reduciendo notablemente la fricción inter e intra partículas y aumentando el contenido de finos.

INCIDENCIA DE LOS PROCESOS CONSTRUCTIVOS

Transporte, distribución, mezclado y humedecimiento

Se presentan aquí acciones similares a las descritas en el numeral anterior, acrecentándose de esta manera la degradación mecánica de los agregados y, como característica principal de estas actividades, el incremento de la segregación y la conse-

Derivación de Minerales Secundarios

Mineral principal	Minerales Secundarios
Olivinos, Carbonatos y Oxidos de Hierro	Iddingsita, serpentina, magnetita.
Piroxenos	Clorita, anfíboles
Hornblenda	Mica, epidota, calcita limonita.
Biotita	Clorita
Moscovita	Ilita
Feldspatos	Caolinita
Sulfuros	Sulfatos, limonita.

INDICE POTENCIAL DE METEORIZACION (Según Carroll)

Augita	39
Basalto	20
Biotita	22
Cuarzo	1
Granito	7
Hornblenda	36
Labrador	20
Moscovita	10
Oligoclasa	15
Olivino	54
Ortosa	12

FIGURA 3. (Referencia 2)

cuenta heterogeneidad, situaciones que propician aun más la degradación y su grado de complejidad.

Calentamiento

Se presenta en la producción de concreto asfáltico, afecta principalmente a los agregados gruesos no produciendo modificaciones significativas en la actividad de los finos; el calentamiento transforma el agregado un material más friable y por tanto más degradable.

Compactación

Para garantizar los altos índices de servicio que actualmente se requieren en carreteras y aeropistas, se ha recurrido al empleo de grandes compactadores que aplican altos niveles de esfuerzos lo cual causa rotura de los agregados, atenuación de aristas y asperezas y producción de finos; esta situación tan desfavorable se ve agudizada si se llega a repetir el proceso de compactación.

Intemperismo durante el proceso de construcción

Como se pudo establecer, todos los procesos constructivos afectan y propician la degradación mecánica de los agregados, dejando de paso terreno abonado para la degradación química.

La situación descrita puede atenuarse empleando técnicas de trabajo depuradas, equipos apropiados y tratamientos previos a los agregados.

COMPORTAMIENTO DURANTE LA VIDA DE SERVICIO

Reacción con ligantes y aditivos

Se analiza aquí la afinidad que se pueda establecer entre los agregados y los ligantes empleados para la fabricación de las capas estructurales del pavimento y su incidencia sobre la degradación de los agregados.

Adherencia de los agregados con ligantes bituminosos

Está en función de la naturaleza de los dos componentes, de la interacción que se desarrolle, de la temperatura de mezclado, de los tratamientos previos y de las sollicitaciones aplicadas; su real evaluación tiene significado en presencia de agua, principal conspirador contra la convivencia armónica del agregado con el ligante. La adherencia se puede definir como la manifestación de fuerzas moleculares afines, sometidas a acciones disociadoras permanentes.

La mineralogía del agregado tiene una gran importancia, pues las cargas superficiales descompensadas que poseen, dan lugar a la orientación de partículas de polaridad contraria, principalmente vapor de agua; para desplazar la película de agua es necesario lograr el mojado del agregado por el ligante, lo cual se logra mediante procesos enérgicos de mezclado en caliente. Establecido el contacto, las moléculas más polares del ligante tenderán a orientarse en la interfase árido-ligante para satisfacer las fuerzas electrostáticas de la superficie mineral.

Por lo planteado, se tiene a la adherencia en función de la naturaleza mineralógica del agregado, del estado de su superficie: rugosidad y grado de limpieza. De la permanencia de la adherencia con el tiempo, dependerá la protección del agregado y de las capas estructurales frente a los procesos degradacionales.

Reacción agregado-cemento

Dado que el proceso de fraguado del hormigón implica diversos tipos de reacciones químicas, la naturaleza de los áridos normalmente considerados inertes, tiene manifiesta importancia por las reacciones secundarias que puedan generarse.

En efecto, ciertos sílices y carbonatos presentan variedades que pueden reaccionar fácilmente con los hidróxidos de sodio y potasio resultantes de la hidratación de cementos ricos en sustancias alcalinas; la formación de estos geles da lugar a incrementos de volumen del agregado y la generación de presiones internas, que conducen a la fisuración del concreto.

Los minerales silíceos susceptibles a tal reacción son:

- el ópalo: variedad de sílice hidratada amorfa.
- la calcedonia: variedad de sílice fibrosa.
- La tridimita: forma de sílice que cristaliza en el

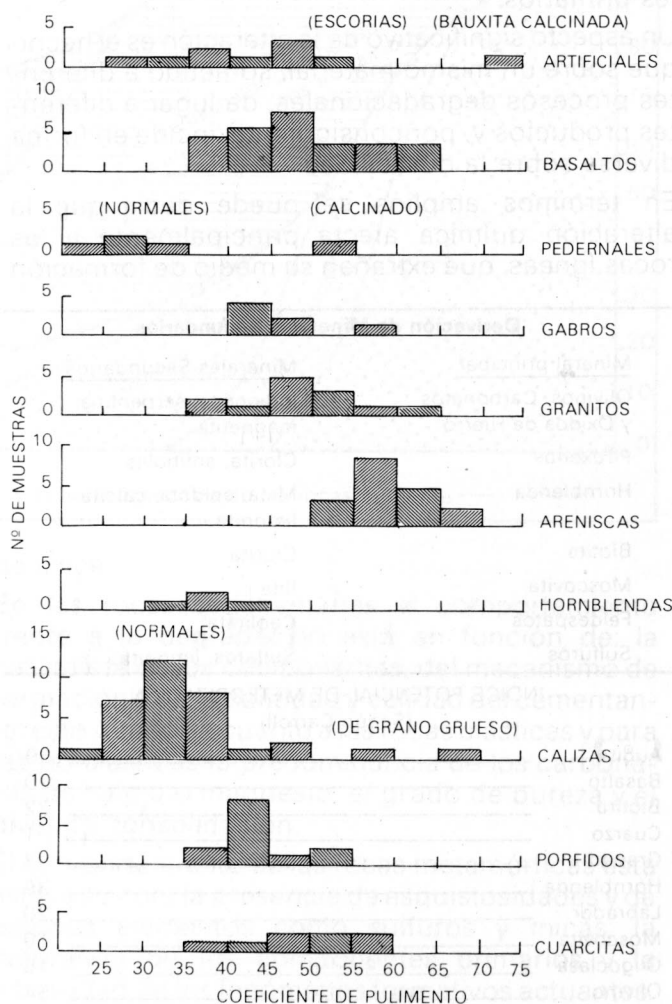


FIGURA 4. Valores del coeficiente de pulimento para diferentes grupos de rocas.

sistema triclinico

- la cristobalita: otra variedad de sílice octaédrica.
- la fase vítrea de numerosas rocas eruptivas.

Están presentes en las: riolitas, andesitas, dioritas, gabros y las calizas silíceas.

La reacción de los carbonatos con los álcalis del cemento se produce por la presencia de la dolomita y con texturas y composición específicas. Grandes cristales de dolomita embebidos en matriz de calcita y arcilla; la composición característica es tal que la calcita y la dolomita se encuentran aproximadamente en igual cantidad y proporciones de arcilla entre el 5 y el 25%, con respecto al peso total.

Diversas pruebas normalizadas se han formulado para detectar el grado de actividad de dichos agregados, conjuntamente con un examen petrográfico detallado que permita detectar la presencia de los minerales susceptibles. Lamentablemente no se cuenta con pruebas verdaderamente contundentes y sus resultados solo se vienen a producir después de un lapso muy grande.

Las reacciones descritas entre el agregado y el cemento dan lugar a la destrucción de la estructura y la desintegración total de los agregados. Es necesario señalar cómo la gran mayoría de las reacciones entre el cemento y los agregados, son benéficas y altamente perdurables; las que son perjudiciales constituyen una mínima parte pero su efecto es altamente letal.

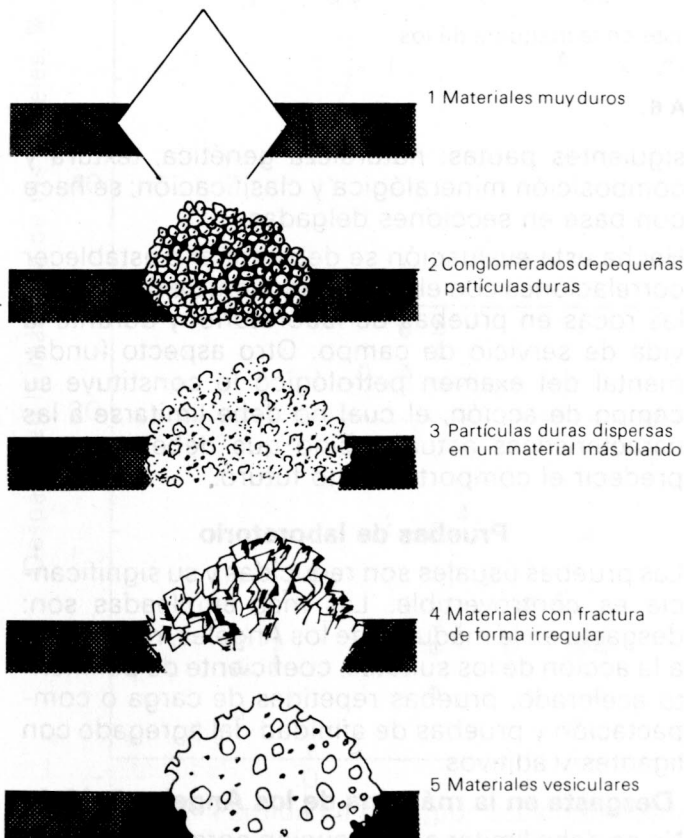


FIGURA 5. Formas teóricas de áridos resistentes al pulimento.

Acción del tráfico

Su acción se traduce en la aplicación de esfuerzos transientes de magnitud variable, que van causando mayor densificación en algunas estructuras, provocando con ello la rotura de algunos fragmentos y la producción de material final. La aplicación de un número de cargas da lugar al agotamiento de los materiales y al rompimiento de las estructuras, quedando los agregados en un estado cercano al de la degradación total.

Otra forma de degradación causada por el tráfico es el pulimento de los agregados que conforman la capa de rodadura; por estar esta faceta de la degradación relacionada con el coeficiente de resistencia al deslizamiento, la seguridad operacional y el nivel de servicio ofrecido, se trata un poco más en detalle, a continuación.

Índice de pulimento

La resistencia al pulimento es una cualidad íntimamente ligada con la naturaleza mineralógica de los agregados, encontrándose un comportamiento dentro de márgenes amplios, tal como se muestra en la Figura N° 4. La mejor respuesta a esta sollicitación se alcanza cuando se cuenta con minerales de diferente tamaño y grado de dureza dentro de una matriz de cristales más pequeños y blandos.

En la Figura N° 5 se presentan cinco modelos teóricos de formas resistentes al pulimento, muchas de las cuales encuentran su correspondiente equivalencia en las rocas comunes.

En aquellas rocas en donde predomina el cuarzo se obtiene un buen comportamiento al pulimento, situación contraria a las rocas de textura homogénea en tamaño y dureza de los cristales, como la exhibida por las calizas y las diabasas. Otro factor incidente es la porosidad, alcanzándose mayor resistencia al pulimento cuanto mayor sea la porosidad.

Esta clase de degradación, por su especial importancia, ha merecido gran atención en cuanto a la formulación de métodos de evaluación y técnicas de regeneración, considerándose que sus efectos nocivos se pueden atenuar dentro de criterios económicos aceptables.

Intemperismo durante la vida de servicio

Una vez entra en servicio la estructura del pavimento, se establece un contacto permanente con los agentes del intemperismo: agua, aire y biota, los cuales trabajan lenta pero efectivamente, degradando cada vez más a los materiales. La evolución ocurre principalmente: por cambios de temperatura y humedad, por reacciones con el CO₂ del agua lluvia y el aportado por la biota, por largos períodos de exposición a la acción solar, por contaminación con los gases que expelen los vehículos, por ausencia de un mantenimiento oportuno y por mal uso de la estructura.

Toda la red vial pavimentada es un inmenso laboratorio para observar el comportamiento de

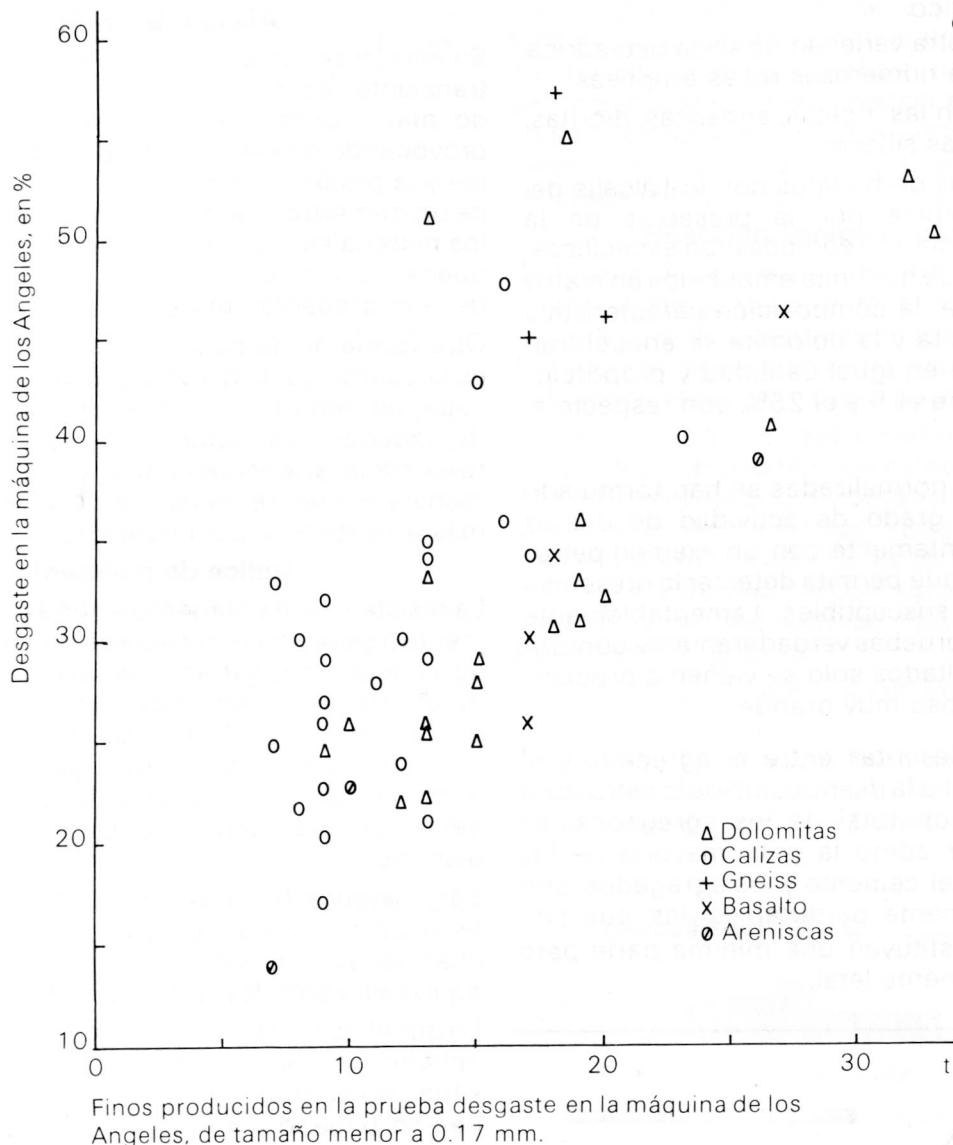


FIGURA 6.

los materiales durante su vida de servicio, de donde se pueden sacar conclusiones sobre la competencia de una u otra roca bajo las condiciones específicas de la obra y su medio circundante. Esta gran opción de evaluación nunca se ha estimado en su real dimensión y se sigue actuando como si se estuviese viajando hacia lo ignoto e incomprensible.

PRUEBAS PARA EVALUAR LA RESISTENCIA DE LOS AGREGADOS A LA DEGRADACION

Examen petrológico

Comprende una clasificación y descripción del material pétreo, con base en exámenes macroscópicos y microscópicos. El macroscópico refleja el aspecto de la muestra a simple vista y se refiere a: tipo de muestra, tamaño del grano, color, componentes apreciables a simple vista, disposición de los elementos constitutivos, homogeneidad, aspecto, dureza, coherencia, tenacidad, forma de la partícula, textura superficial de la partícula y tipo de arista.

El examen microscópico puede efectuarse bajo las

siguientes pautas: naturaleza genética, textura y composición mineralógica y clasificación; se hace con base en secciones delgadas.

Hecha esta evaluación se debe entrar a establecer correlaciones con el comportamiento exhibido por las rocas en pruebas de laboratorio y durante la vida de servicio de campo. Otro aspecto fundamental del examen petrológico lo constituye su campo de acción, el cual no debe limitarse a las características actuales sino que debe tratar de predecir el comportamiento futuro.

Pruebas de laboratorio

Las pruebas usuales son reducidas y su significancia es controvertible. Las más empleadas son: desgaste en la máquina de los Angeles, resistencia a la acción de los sulfatos, coeficiente de pulimento acelerado, pruebas repetidas de carga o compactación y pruebas de afinidad del agregado con ligantes y aditivos.

Desgaste en la máquina de los Angeles D.M.A.

No se debe limitar a la ejecución normalizada de la prueba, sino que su campo de evaluación debe

cubrir el análisis de la granulometría y la clase de degradación del material, después de la prueba de desgaste.

En la publicación de la referencia N° 1, se presentan algunas conclusiones sobre este tema, aplicables a las condiciones específicas de EE.UU., pero que pueden ser tomadas como tendencias:

- a) El mayor desgaste va acompañado con una mayor producción de finos durante la trituración y durante la prueba.
- b) A mayor producción de finos durante la prueba, mayor susceptibilidad de degradación.
- c) La prueba de desgaste es un buen indicador de la resistencia a la degradación especialmente con las calizas.
- d) Para las rocas ígneas tipo: basalto, andesita, diabasa, y metamórficas tipo: hornblenda, esquistos, se encontró que el indicador de resistencia a la degradación no era el desgaste obtenido en el prueba normalizada sino el que se presenta con muestra húmeda. Cuando se añade agua en un 50% del peso de la muestra de agregado, el desgaste sobre muestra húmeda es mayor que en la prueba normalizada. Se considera que un agregado es de poca resistencia a la degradación si el desgaste sobre muestra húmeda es un 50% mayor o más que el obtenido sobre muestra seca.

Clase de roca	D.M.A. en seco	D.M.A. en agua
Caliza de grano fino	32	22
Caliza de grano grueso	49	42
Dolomita arcillosa, meteorizada	50	73
Basalto sano	16	16
Basalto alterado	22	36
Gneiss granítico	42	49

- e) Entre mayor sea el tamaño de los granos y la porosidad, mayor será la resistencia en la máquina de los Angeles y menor la resistencia a la degradación.
- f) En la Figura 6, se presenta parte de los resultados obtenidos en la prueba desgaste en la máquina de los Angeles, la cual indica la tendencia creciente de producción de finos a medida que aumentan las pérdidas por desgaste.

Resistencia a la acción de los sulfatos

Si bien es una prueba segura, no es representativa de los mecanismos de alteración o deterioro propios de las zonas tropicales y, por tanto, sus resultados no deben gozar de contundencia cuando se trata de aceptar o rechazar un material. Mientras se desarrollan pruebas acordes con el intemperismo tropical y se fijan niveles de aceptabilidad, es necesario seguir ejecutándola, relacionando sus resultados con los aportados por el

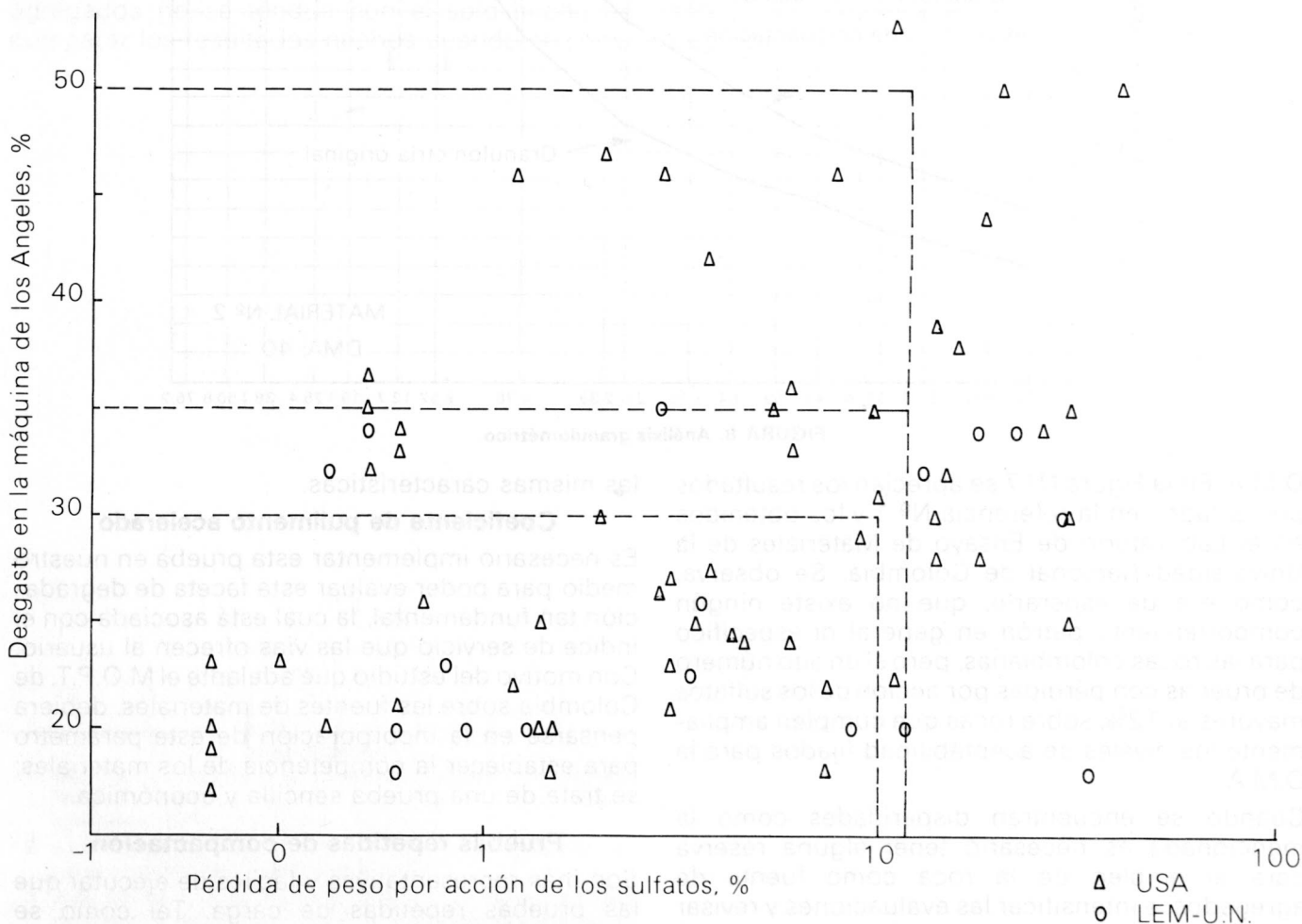


FIGURA 7.

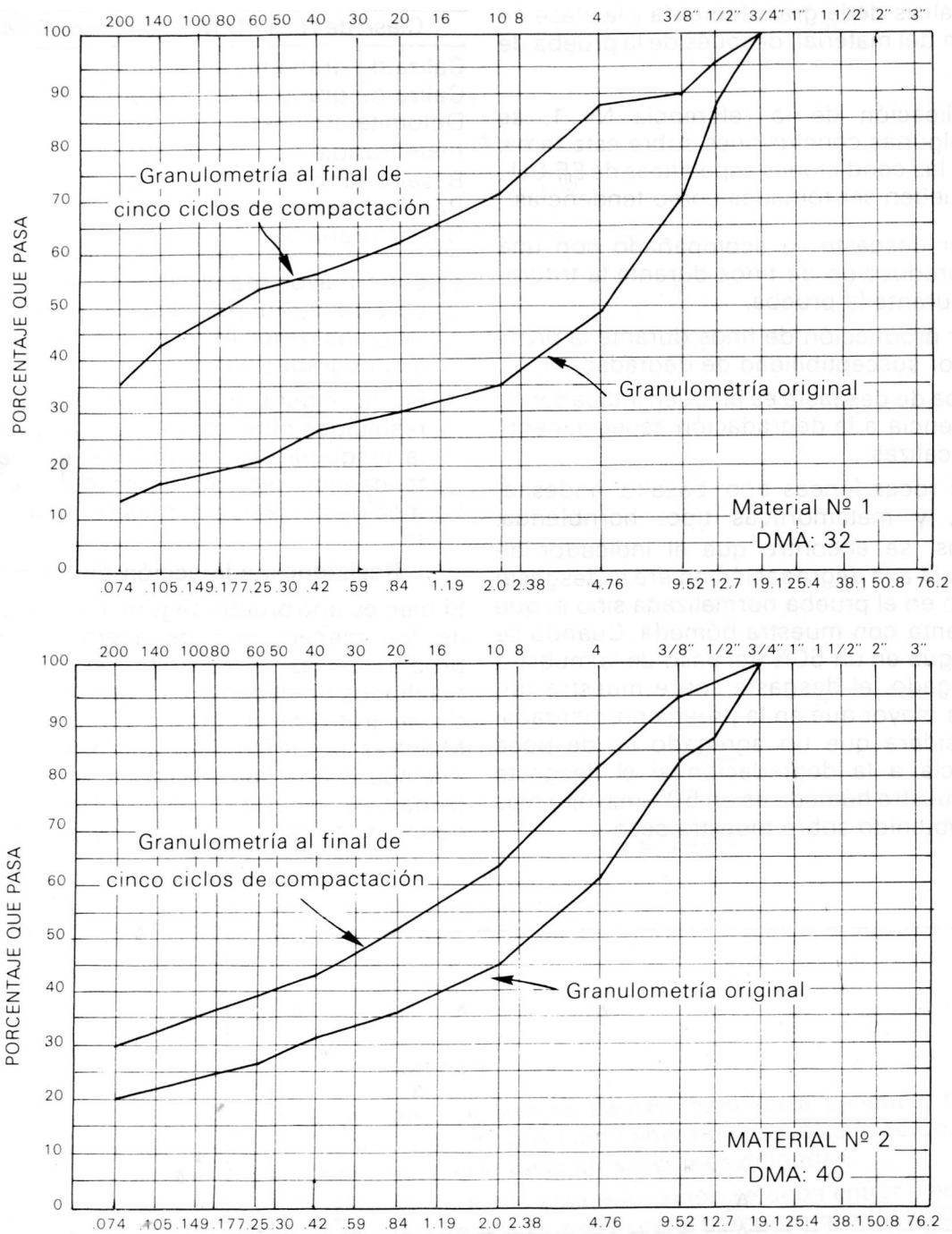


FIGURA 8. Análisis granulométrico.

D.M.A. En la Figura N° 7 se aprecian los resultados presentados en la referencia N° 1 y los obtenidos en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia. Se observa, como era de esperarlo, que no existe ningún comportamiento patrón en general ni específico para las rocas colombianas, pero sí un alto número de pruebas con pérdidas por acción de los sulfatos mayores al 12%, sobre rocas que cumplen ampliamente los niveles de aceptabilidad fijados para la D.M.A.

Cuando se encuentran disparidades como la mencionada es necesario tener alguna reserva para el empleo de la roca como fuente de agregados, e intensificar las evaluaciones y revisar las experiencias certificadas sobre materiales de

las mismas características.

Coefficiente de pulimento acelerado

Es necesario implementar esta prueba en nuestro medio para poder evaluar esta faceta de degradación tan fundamental, la cual está asociada con el índice de servicio que las vías ofrecen al usuario. Con motivo del estudio que adelante el M.O.P.T. de Colombia sobre las fuentes de materiales, debiera pensarse en la incorporación de este parámetro para establecer la competencia de los materiales; se trata de una prueba sencilla y económica.

Pruebas repetidas de compactación

Son más representativas y fáciles de ejecutar que las pruebas repetidas de carga. Tal como se muestra en la Figura 8 la degradación por compac-

tación está en relación directa con el D.M.A. y resulta ser un buen indicador de la evolución futura de la distribución de tamaños y la producción de finos.

Otra prueba alterna podría ser la prueba de friabilidad en donde se mide la resistencia del agregado contenido en un molde metálico, cuando se le comete a una carga de 40 toneladas por medio de un pistón. En la prueba normalizada se emplean 3.5 kilogramos de agregado con tamaño comprendido entre 1/2" y 3/8", pesando la cantidad de finos producidos (inferiores al tamiz N° 12) que expresados en tanto por ciento en peso constituye el coeficiente de friabilidad.

Pruebas de afinidad entre el agregado con ligantes y aditivos

Se encuentra en la literatura especializada un gran número de pruebas normalizadas para la evaluación de este aspecto fundamental en la durabilidad de las estructuras; existe la tendencia a preferir e implementar pruebas con sollicitaciones dinámicas por su mayor representatividad. Este grupo de pruebas debe hacerse invariablemente cuando se trata de fuentes nuevas o de fuentes sin el respaldo certificado sobre el comportamiento de sus materiales.

Evaluación del comportamiento de los agregados hasta ahora emleados en nuestras vías

Cuánta información sobre comportamiento de los agregados no se tendría con el solo hecho de comparar los resultados hechos cuando se cons-

truyeron las carreteras y los efectuados durante el estudio de rehabilitación de la red vial pavimentada, realizado a partir de 1974; es indudable que de haberlo hecho se tendría un buen punto de iniciación para el estudio de la durabilidad de agregados y estructuras, ya que en él también se evaluó la condición de servicio de los pavimentos.

Es necesario implementar y adoptar una metodología sobre ejecución normalizada de pruebas, evaluación de condiciones y comportamientos, recuperación y clasificación de la información, análisis de resultados y formulación de recomendaciones.

CONCLUSIONES

El estado actual del conocimiento sobre la durabilidad de nuestros materiales pétreos es nulo y no se observa ninguna acción por parte de las entidades interesadas para modificar tal condición.

Es necesario aprovechar racionalmente la escasa información que se está produciendo, relacionada con la resistencia a la degradación, con miras a identificar en un futuro patrones de comportamiento por clases de rocas y regiones climáticas de Colombia.

En los estudios que actualmente se están realizando para la selección de las fuentes de materiales, deben ejecutarse las evaluaciones descritas en el numeral 6, con miras a predecir alguna tendencia sobre la competencia de los agregados frente a la degradación.

BIBLIOGRAFIA

1. NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM REPORT. Test for evaluating degradation of base course aggregates, 1970.
2. José Salinas, Recomendaciones para una normalización del estudio petrológico de los áridos, 1973.
3. Juan Montero. Clasificación petrológica de agregados para pavimentos. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, 1980.