

Estudio preliminar de las características petrográficas, petrofísicas y comportamiento mecánico de rocas naturales tipo “piedra bogotana” y “mármol royal bronze” utilizadas en construcciones patrimoniales y recientes en Colombia

Preliminary research of petrographic and petrophysical properties and mechanical behavior of natural stones as “Piedra Bogotana” and “Mármol Royal Bronze” used in heritage buildings and new constructions in Colombia

Daniela Camila Rocha-Vargas^{1a}, Javier Eduardo Becerra- Becerra^{1b}, David Benavente^{2a},
Juan Carlos Cañaveras^{2b}, Antônio Gilberto Costa³

¹Universidad Santo Tomás, Colombia. Correos electrónicos: ^a danielarocha@usantotomas.edu.co,
^b javier.becerra@usantoto.edu.co

²Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, España.
Correos electrónicos: ^a david.benavente@ua.es, ^b jc.cañaveras@ua.es

³Labtecrochas Instituto de Geociencias, Universidad Federal de Minas Gerais,
Belo Horizonte - Brasil. Correo electrónico: ag.costa@uol.com.br

Recibido: 20 mayo, 2018. Aceptado: 30 enero, 2019. Versión final: 29 mayo, 2019.

Resumen

La piedra natural ha sido un elemento importante en la construcción colombiana desde la época colonial y hasta la actualidad, especialmente en la ciudad de Bogotá. Rocas areniscas y calizas son elementos decorativos y estructurales de edificaciones patrimoniales y recientes, y su uso gana notoriedad con la recuperación de espacios urbanos para el disfrute de la población. En este trabajo se muestran los resultados de algunos ensayos de caracterización tecnológica de dos variedades de rocas ampliamente utilizadas en la construcción, conocidas coloquialmente con los nombres de piedra muñeca o piedra bogotana y mármol royal bronze, utilizadas tanto en edificaciones patrimoniales como recientes. Los métodos de ensayo seguidos para evaluar algunas de las propiedades petrofísicas y mecánicas de estas dos rocas fueron análisis petrográfico, índices físicos (densidad aparente, porosidad aparente y absorción de agua), resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia al desgaste y resistencia al impacto, expuestos en la norma brasileña ABNT NBR15845 de 2010. Los resultados obtenidos permiten determinar, de forma preliminar, que la piedra bogotana en sus dos variedades (amarilla y rosada) puede ser usada como elemento estructural (muros, columnas, vigas y cimentaciones) y como material de revestimiento de edificios o de pisos y plazoleas, con la recomendación de uso de la variedad amarilla preferiblemente en espacios interiores; el mármol royal bronze puede ser usado en cualquier tipo de revestimiento de paredes, pisos y calles de alto tráfico, como elemento estructural y en acabados.

Palabras clave: rocas ornamentales; caracterización; normatividad; areniscas; calizas.

Abstract

Natural stone has been an important element in Colombian construction since the Hispanic period, especially in Bogotá, capital of Colombia. Sandstone and limestone rocks are ornamental and structural elements on heritage buildings and new constructions, and their use is important to the revitalization of urban spaces for the enjoyment of the population. This paper shows the results of some technological characterization tests of two rock types widely used in construction, commonly known as Piedra Muñeca or Piedra Bogotana and Mármol Royal Bronze, which are used in historical buildings as well as in modern ones. The petrophysical and mechanical properties of these rocks were identified in a preliminary way through petrographic analysis, physical properties (bulk density, bulk porosity and water absorption), compressive strength, flexural strength, weathering resistance and impact resistance, as shown in the Brazilian technical standard ABNT NBR15845. The obtained results allow determining, in an early way, that the two varieties (yellow and pink) of the Piedra Bogotana stone can be used as a structural element (walls, columns, beams and foundations) and also as dimension stone for buildings, floors and squares; the use of yellow variety especially on interior spaces is recommended. Mármol Royal Bronze can be used in any wall cladding, flooring or busy streets as a structural or finishing element.

Keywords: ornamental stone; characterization tests; technical standards; sandstones; limestones.

1. Introducción

Desde la antigüedad las rocas naturales han sido utilizadas para mejorar la calidad de vida de las poblaciones, como materiales base para la construcción de obras de infraestructura en elementos estructurales (columnas, muros y cimentaciones), materiales de revestimiento y acabado de fachadas, recubrimiento de paredes, pisos exteriores e interiores, plazoletas, rampas de acceso y circulación peatonal y puentes. Además, son utilizadas como material granular para la fabricación de concretos convencionales y especiales, como material para enchapes de cocinas, baños, chimeneas, elementos decorativos exteriores e interiores y finalmente como material para la elaboración de monumentos.

Las rocas ornamentales son materiales naturales extraídos en bloques que se transforman por medio de distintos procesos, como el corte, pulido y lustre. Estos materiales usados en obras civiles y de arquitectura no solo se destacan por sus cualidades estéticas, sino por sus características texturales, composicionales y mineralógicas. Estas a su vez determinan sus propiedades físicas, como densidad, porosidad, absorción y peso específico aparente, y sus propiedades mecánicas, como resistencia a compresión, carga puntual, flexión, abrasión y anclaje [1].

Las propiedades mecánicas a menudo se ven comprometidas por el desarrollo de procesos de alteración, como exfoliación, fracturas, disolución mineral y otros que se generan al exponer los materiales a ambientes externos [2]. El estudio de cada tipo de material con potencial de uso en las diferentes obras de construcción debe ser una práctica indispensable en la ingeniería civil, ya que permite reconocer sus condiciones de durabilidad y funcionalidad.

En el marco del proyecto de investigación “caracterización físico-mecánica, química y mineralógica de areniscas del grupo Guadalupe, utilizadas como materiales de construcción en la zona franca de Tocancipá-Cundinamarca, en la cantera Rodeb y Acopios –Sector Hato Grande-Sopó”, desarrollado por el grupo de investigación de la Facultad de Ingeniería Civil (GIFIC) de la Universidad Santo Tomás, se toman dos ejemplos de rocas utilizadas en Colombia como rocas ornamentales, la arenisca piedra bogotana o piedra muñeca y la caliza conocida comercialmente como mármol royal. Se realizan algunos ensayos preliminares de caracterización tecnológica para analizar sus propiedades físico-mecánicas y mineralógicas y reconocer a grandes rasgos sus posibles usos en construcción.

1.1. Potencial geológico de rocas ornamentales en Colombia

Colombia posee una variedad de rocas con posible utilización como roca ornamental en las construcciones. Estudios de investigación exponen varias áreas fuente en la región Caribe donde afloran unidades geológicas constituidas por granitos, mármoles, gabros, calizas arrecifales y travertinos, y la región Andina, con mármoles, calizas cristalinas, travertinos, areniscas, esquistos, granitos, serpentinitas y pizarras [3]. Bernal *et al.* [4] identificaron litologías de rocas ígneas, de tipo granítico, andesítico y riolítico en la Sierra Nevada de Santa Marta, departamentos del Cesar y la Guajira, con gran potencial para labores de extracción y transformación para mercados nacionales e internacionales. Vargas [5] menciona que en Colombia se han identificado depósitos de travertino en los departamentos de Caldas y Boyacá, especialmente en los municipios de Villa de Leyva, Firavitoba y Tibasosa; los

materiales se han usado para enchapados y sus desperdicios para la producción de cal agrícola. Los travertinos también han sido utilizados como material de fachada en importantes construcciones de Bogotá, como la Biblioteca Luis Ángel Arango. Becerra [6], en su tesis de doctorado, expone la existencia de diferentes tipos de calizas de la formación La Tampa que afloran en el Caribe colombiano ampliamente utilizadas en las más importantes obras arquitectónicas de la ciudad de Medellín, dentro de las cuales se encuentra la caliza comercialmente llamada “mármol royal bronze”. Otro de sus estudios expone el gran potencial geológico para la producción de rocas ornamentales en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca y sur de Santander, con presencia especialmente de rocas sedimentarias como las areniscas cuarzosas de la formación Une, comercializadas en formatos de lajas rústicas, ampliamente explotadas y utilizadas en las obras civiles y de arquitectura de la región [7, 8].

En el altiplano cundiboyacense situado en la parte axial de la Cordillera Oriental, el cual se extiende desde el sur de la ciudad de Bogotá hasta el norte del municipio de Villapinzón, aflora una cuenca sedimentaria con gran variedad litológica. El grupo Guadalupe, definido al Oriente de Bogotá, hace parte de esta cuenca, y está conformado por las formaciones Arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna, que en términos generales se conforma desde areniscas arcillosas grisáceas a blancas de grano fino hasta las areniscas blanco y amarillento de grano medio [9] [10]. En la formación Labor se aprovechan comercialmente rocas areniscas conocidas con el nombre de piedra bogotana o piedra muñeca, utilizadas desde el siglo XIX en la construcción de importantes edificios patrimoniales y actualmente extraídas y utilizadas como material de construcción en grandes obras civiles de la región y como material para restauración patrimonial.

1.2. Extracción y transformación de rocas ornamentales en Colombia

El material de construcción de cantera del que hacen parte las rocas ornamentales es explotado en zonas de cordillera como las del altiplano cundiboyacense, Santander, Valle del Cauca, Nariño, Antioquia, Huila, Caldas y Quindío. Su extracción se basa en la técnica de canteras, caracterizada por el gran número de bancos que se abren para arrancar bloques y la obtención de planos de corte definidos, el método de corte con hilo diamantado es el más eficiente para realizar esta tarea [11] [12]. La transformación de la roca ornamental en Colombia se basa en procesos convencionales de dimensionamiento y de acabado, como pulido, lustre,

flameado, abujardado, apomazado y arenado, realizados luego de cortar en formas variadas los bloques o placas extraídas [13].

No obstante, en gran parte del territorio colombiano tanto la extracción como la transformación de rocas ornamentales se realiza de manera artesanal, con poco apoyo técnico y aprovechamiento inadecuado. Ejemplo de esto es la producción artesanal de rocas areniscas en formato de lajas rústicas en canteras localizadas en los municipios de Duitama y Santa Rosa de Viterbo (departamento de Boyacá), usadas en trabajos de restauración de patrimonio arquitectónico y como materiales de fachada, su proceso de extracción se realiza con poco apoyo técnico y sin estudios que definan características para su uso en revestimiento o procesos de restauración patrimonial [8]. El departamento del Huila también se caracteriza por la extracción con métodos y procedimientos inadecuados que generan continuamente materiales de baja calidad [14]. A esto se suman las afectaciones que estas actividades mineras provocan al medioambiente y la salud, además de las grandes pérdidas de material generada por el volumen de residuos resultante [15].

1.3. Mercado de rocas ornamentales en Colombia

Desde hace varios años algunas regiones de Colombia han sido fuentes de exportación de un gran número de piedras naturales reconocidas en el ámbito nacional e internacional. Entre estas se destacan las calizas arrecifales de Albornoz y Turbaco Bolívar; los mármoles y travertinos de Bosconia y La Paz, en el Cesar; las calizas y el mármol de Toluviejo, Sucre; los denominados mármoles de la Ciénaga en la Sierra Nevada de Santa Marta; los mármoles de diferentes tonalidades de la ciudad de Neiva y los municipios de Palermo y Santa María, en el departamento del Huila; las calizas cristalinas de Curití y los Santos y los mármoles de Tona y Mutiscua, en Santander; areniscas en varios municipios de Boyacá y Cundinamarca, como Sibaté, Madrid, Soacha, Mosquera, Tocancipá, Gachetá y en la ciudad de Bogotá; areniscas del municipio de Barichara y esquistos de los municipios de Aratoca y Santa Bárbara, en Santander; algunos granitos y mármoles del municipio de Cepitá, en el departamento de Santander; el granito gris de Mariquita, Tolima; las serpentinitas de la vereda La María, en Ibagué, Tolima, filitas y esquistos “piedra valdivia”, de Valdivia y Yarumal, en Antioquia, las tobas volcánicas de Popayán, en el Cauca, las pizarras en la región de Dagua, en el valle del Cauca, y las rocas volcánicas en Ipiales, Pasto, Cumbal y Potosí, en el departamento de Nariño [3].

El dinamismo de la industria de la construcción en los últimos años ha llevado al crecimiento de la demanda interna y externa de rocas ornamentales en Colombia y, por tanto, a la evolución de la oferta; gran parte de la producción nacional del sector ha sido destinada con más intensidad en el consumo interno [16]. De acuerdo con la Cámara Colombiana de la Construcción (Camacol), en los próximos años se espera un crecimiento de 4,5 % para el consumo de minerales no metálicos (piedra común, mármol, granito, arenas de peña y río, grava, y gravilla) teniendo en cuenta que el consumo de dichos materiales para el año 2015 fue de 1857 millones de dólares, y se espera que para el año 2018 sea de 2314 millones de dólares, cifras que evidencian el crecimiento activo del sector de la piedra natural en el país. Los más importantes mercados consumidores a los que apunta la producción colombiana de rocas ornamentales son Estados Unidos, la Unión Europea, Brasil, México, Chile y Perú [17].

1.4. Uso de rocas ornamentales en Colombia

En Colombia se ha hecho uso de la piedra natural como un material de revestimiento y acabado de las construcciones desde el siglo XIX, siendo elementos importantes en fachadas, pisos, elementos estructurales y ornamentos de importantes construcciones patrimoniales del país. En la actualidad son importantes en la construcción colombiana; se destaca el uso de rocas como granitos, mármoles, travertinos, calizas, areniscas y pizarras [3]. En particular, la arenisca extraída en las canteras del departamento de Cundinamarca, comercialmente llamada piedra bogotana o piedra muñeca, ha sido ampliamente utilizada en construcciones del patrimonio republicano de la ciudad de Bogotá, como en la fachada y acabados de la iglesia de la Candelaria, el colegio San Bartolomé, el Teatro Colón, la Casa de Nariño, el Capitolio Nacional, donde además sirvió como elemento estructural, entre otras (figuras 1 y 2).



Figura 1. Utilización de piedra muñeca en construcciones patrimoniales de la Ciudad de Bogotá, Catedral Primada de Colombia, Capilla del Sagrario y Arquidiócesis de Bogotá. Fuente: elaboración propia.



Figura 2. Utilización de piedra muñeca en la remodelación del Teatro Colón en Bogotá. Fuente: elaboración propia.

A través de los años esta arenisca se ha convertido en uno de los materiales selectos para utilizar como roca ornamental en Bogotá, ya que se ha dado gran importancia a seguir con el estilo patrimonial de la ciudad y en términos comerciales se ha buscado el aprovechamiento del gran recurso en la región. Esto se evidencia en las construcciones de diferentes edificios empresariales ubicados en el Centro Internacional, en edificios y plazoletas de universidades como la Nacional, la Javeriana, los Andes, el Externado y la Sabana; también en importantes hoteles y restaurantes ubicados en las reconocidas Zona G y Zona T, en esbeltos e imponentes edificios de tipo empresarial ubicados en el norte de Bogotá y en importantes conjuntos residenciales de las zonas más exclusivas de la ciudad. Otras rocas ornamentales también han sido usadas recientemente en el revestimiento de pisos y fachadas de grandes construcciones, como travertinos en las fachadas de la Biblioteca Luis Ángel Arango, calizas utilizadas en el sendero peatonal de la Carrera Séptima desde la Plaza de Bolívar hasta la Avenida Jiménez, en la Estación de Transmilenio Museo Nacional y en otras obras de la ciudad (figuras 3 y 4).

1.5. Ensayos de caracterización tecnológica

Los ensayos de caracterización tecnológica son pruebas experimentales que permiten conocer de manera anticipada cada una de las características de las rocas ornamentales; además, dan idea de su resistencia y durabilidad al ser usadas en las construcciones, partiendo del análisis de las condiciones a las que se encuentren expuestas y de los agentes externos que las rodean. Algunas entidades nacionales e internacionales como la Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), la

Asociación Española de Normalización (UNE), la American Society for Testing and Materials (ASTM), el Deutsches Institut für Normung (DIN), la International Society for Rocks Mechanics (ISRM), entre otras [18] han desarrollado normas y especificaciones de ensayo que controlan su aplicación, de forma que se potencialicen sus propiedades y se evite al máximo la presencia de patologías durante su vida de servicio. Dentro de los métodos de ensayo recomendados se encuentran los siguientes: análisis petrográfico, índices físicos, análisis químico, coeficiente de dilatación térmica lineal, resistencia a la compresión uniaxial, resistencia a la flexión, resistencia al impacto, resistencia al anclaje, resistencia a las heladas, resistencia al desgaste y resistencia al SO₂ [19]. Todo este conjunto de ensayos permite realizar una caracterización tecnológica completa de la roca antes de ser utilizada y con fines preventivos (tabla 1).



Figura 3. Utilización de roca caliza en el sendero peatonal de la Avenida Jiménez en el centro de Bogotá.
Fuente: elaboración propia.

El Instituto Colombiano de Normas técnicas (Icontec) [20], específicamente el Comité 043 “Cerámicos, Refractarios y Piedras Naturales no estructurales para uso en construcción”, se encuentra trabajando en la formulación de normas técnicas para la aplicación de métodos de ensayos de caracterización tecnológica, dado que estas aún no se han implementado para controlar el uso de materiales rocosos como piedra ornamental. La normatividad debe hacerse extensiva a productores y profesionales de la ingeniería y la arquitectura para que con la ejecución de los ensayos normalizados se puedan definir y elegir materiales idóneos para los distintos usos (tab. 1).



Figura 4. Utilización de Piedra Muñeca en la fachada del edificio de Suramericana ubicado en la calle 72 con carrera 11 en Bogotá. Fuente: elaboración propia.

1.5.1. Estado del arte

Análisis petrográfico: Para realizar un análisis de propiedades petrográficas de una roca es necesario entender la íntima relación que existe entre la durabilidad de la roca y su mineralogía. Además de la composición mineralógica de un material, este debe contar con una buena textura y estructura [21]. Cabe resaltar que el cuarzo, la moscovita y los feldespatos según la serie de Goldich son los minerales más estables, por lo que se supondría que una roca compuesta principalmente por estos minerales es mineralógicamente bien constituida [6]. La textura corresponde al aspecto microscópico general de la roca en el que se incluye la forma de los minerales, su granulación y la forma en la que se relacionan y distribuyen; su observación es importante para predecir la durabilidad de una roca que va a ser expuesta a fricción, esfuerzos compresivos y flectores, y a la probabilidad de propagación de líquidos, dependiendo de la microfisuración [18].

Tabla 1. Métodos de ensayo de caracterización tecnológica en rocas ornamentales.

Método de ensayo	Finalidad	Descripción del método	Normas internacionales
1. Análisis petrográfico	Conocer la composición mineralógica de la roca, así como su textura y estructura.	Observaciones microscópicas de secciones delgadas de rocas mediante un microscopio óptico de luz transmitida.	ABNT NBR 15845: 2010(A)
2. Índices físicos (densidad aparente, porosidad aparente y absorción de agua)	Determinar la incidencia de los espacios vacíos, las microdiscontinuidades y los valores de la absorción de agua de la roca, en la resistencia mecánica de esta.	Probetas cúbicas de 7 cm de arista previamente secadas (M_{sec}) se sumergen en agua filtrada durante un tiempo mínimo de 24 h hasta alcanzar la saturación (M_{sat}); posteriormente se sumergen en agua destilada y se mide la masa hidrostática (M_{sub}), correspondiente al agua desplazada por los poros rellenos de fluido. Por diferencia de masas se realizan los cálculos.	UNE 22-172, 182 Y 191 ABNT NBR 15845: 2010(B) ASTM C97
3. Análisis químico	Conocer la composición química de una roca para identificar presencia de compuestos fácilmente alterables que afectan su durabilidad.	Se determina el contenido porcentual de algunos elementos químicos por fluorescencia de rayos X o difracción de rayos X.	
4. Resistencia a la compresión uniaxial	Reconocer la capacidad de la roca para soportar grandes cargas, especialmente cuando va a ser utilizada como elemento estructural.	Aplicación de cargas crecientes hasta alcanzar la rotura en seis probetas cúbicas de 7 cm de arista en estado seco y húmedo.	UNE 22-175, 185 Y 194 ABNT NBR 15845: 2010(E) ASTM C170
5. Resistencia a la flexión	Evaluar la idoneidad de un tipo de roca para su uso en revestimiento o como elemento estructural.	Seis probetas prismáticas de dimensiones determinadas en estado seco y húmedo son ubicadas en una prensa hidráulica a la que se le adapta un dispositivo de flexión especificado por medio del cual se transmite la carga hasta que ocurra la rotura.	UNE 22-176, 186 Y 195 ABNT NBR 15845: 2010(F) ABNT NBR 15845: 2010(G) ASTM C880
6. Resistencia al impacto	Evaluar la capacidad de una roca para soportar grandes impactos en usos como pisos interiores y exteriores, rampas, escaleras y mesas.	Se utilizan cinco placas de dimensiones determinadas; sobre cada placa situada en una cama de arena especificada se deja caer una esfera de acero de 1 kg desde una altura inicial de 20 cm, que se va aumentando cada 5 cm hasta que se produce la rotura de la muestra.	UNE 22-179, 189 Y 196 ABNT NBR 15845: 2010(H) ASTM C99
7. Resistencia al desgaste por abrasión	Definir la capacidad al desgaste por fricción de una roca al exponerse a condiciones de alto tráfico.	Dos probetas cúbicas de 5 cm de altura y 7 cm en cada lado se someten a desgaste en un recorrido de 1000 m sobre una pista giratoria que contiene un abrasivo. Cada probeta está sometida a una presión constante que produce el desgaste.	UNE 22-173, 183 Y 192 ABNT NBR 12042: 1992(C) ASTM C241 ASTM C1353
8. Resistencia a las heladas	Determinar la idoneidad de una roca para su utilización en pavimentos y revestimientos exteriores de edificios en áreas geográficas con climas húmedos y fríos.	Tres probetas cúbicas de 7 cm de arista se secan hasta peso constante y luego se sumergen totalmente en agua, en el tanque de deshielo durante 48 h, posteriormente se someten a 25 ciclos de hielo y deshielo, (hielo - 20h a temperatura de -15 °C) (deshielo - 4 h en agua a temperatura de 16 a 20 °C). Finalizado el último ciclo se desecan las probetas,	UNE 22-174, 184 Y 193 ABNT NBR 12042: 1992(D)

		hasta peso constante y se determina el peso seco final.	
9. Resistencia al anclaje	Determinar el espesor mínimo y el peso que deben tener las placas utilizadas en los revestimientos, factores condicionados por el valor de la carga de rotura que cada placa de roca ornamental puede soportar en los agujeros de anclaje a un paramento.	Aplicación de una fuerza en dirección perpendicular a las caras de la probeta, a través de un anclaje previamente colocado en un taladro en uno de sus laterales y medición de la carga de rotura de la probeta.	UNE-EN 13364
10. Coeficiente de dilatación térmica lineal	Determinar el posible descascaramiento de una roca cuando se calienta (dilata) o se enfría (contrae).	La probeta se ubica en un medidor de expansión constituido por un plato inferior y por una barra horizontal superior soportada por dos columnas de acero, con un captador que transforma el desplazamiento mecánico en una señal eléctrica; la señal se puede recoger en un registrador y se utiliza en una ecuación para el cálculo del coeficiente de dilatación térmica lineal.	UNE 22-172, 182 Y 191 ABNT NBR 12042: 1992(C)
11. Resistencia al SO ₂	Evaluar el comportamiento de una roca que va a ser utilizada a la intemperie en ambientes urbanos e industriales contaminados, como pavimentos, revestimiento de exteriores y cubiertas de edificios.	Se utilizan siete placas, tres probetas se secan y otras tres se sumergen en agua desionizada durante 24 h, luego se pesan y se colocan en posición vertical en una cámara hermética 10 cm por encima de un recipiente, con una disolución de ácido sulfuroso, que es la que genera los vapores de SO ₂ , a los 21 días se extraen de la cámara y se dejan secar 24 h y se pesan para dar la pérdida o ganancia de peso, y se hace una valoración visual de las alteraciones superficiales.	EN 13919
12. Ensayo de cristalización de sales	Permite evaluar la susceptibilidad y deterioro de las rocas con relación a este proceso cuando son expuestas a la intemperie.	Siete probetas son sometidas a ciclos continuos de saturación con sulfato de sodio hidratado (Mirabilita) y secado en horno a temperatura y humedad controladas. Se registra la pérdida de material debida al proceso de cristalización de sales (Thernardita) expresada en unidades de masa y se comparan las muestras sometidas al ensayo con muestras dejadas como patrón de referencia.	EN 12370

Fuente: [6, 18]

La estructura también es otra condicionante petrográfica del comportamiento tecnológico de las rocas, ya que representa sus discontinuidades físicas que interfieren principalmente en la percolación de fluidos, en la resistencia mecánica y en la velocidad de propagación de ondas longitudinales [22]. El contenido de matriz, especialmente matriz arcillosa, presente en una roca también es una característica petrográfica que tiene gran incidencia en la resistencia fisicomecánicas de las rocas; los minerales arcillosos propensos al hinchamiento reducen la capacidad de soporte y estabilidad de los materiales, ya que su comportamiento varía de acuerdo con el estado en el que se encuentre (seco o saturado) [23]. El estudio del tipo de matriz en una roca es complejo y por ello se requiere un análisis mineralógico por difracción de rayos X (DRX) que permita demostrar la existencia de dichos minerales propensos al

hinchamiento, posiblemente uno de los factores predominantes en los resultados de resistencia mecánica.

Otro componente petrográfico que afecta en gran medida el comportamiento físico y mecánico de una roca es la porosidad, una fase única formada por espacios vacíos que constituye con el resto de las fases minerales el volumen rocoso total y posee características y elementos texturales, como tamaño, forma y distribución que contribuye a la textura de la roca. No obstante, presenta una diferencia fundamental respecto a las fases minerales, y es la continuidad que normalmente presentan los espacios vacíos, constituyendo lo que suele denominarse sistema poroso [24].

Índices físicos (densidad aparente, porosidad aparente y absorción de agua): en el sector de las rocas

ornamentales, los índices físicos considerados son la densidad aparente, la porosidad aparente y la absorción de agua. El término aparente indica que el volumen medido para los cálculos es relativo al volumen total de las muestras analizadas, es decir, el volumen de sólidos más el volumen de poros [6]. La densidad aparente, también conocida como masa específica aparente seca o densidad Bulk, se define como el cociente entre la masa de la roca en seco y el volumen de la probeta, incluyendo la porosidad total [25]. La porosidad aparente o porosidad total es la suma de la porosidad conectada y no conectada e indica el porcentaje total de espacios vacíos en un volumen de roca; la porosidad conectada es el volumen de poros que presentan un cierto grado de interconexión con el exterior, de forma que un fluido puede ser transportado a su través, y la porosidad cerrada, aislada o no comunicada, como su nombre indica, es aquel volumen de poros de una roca que no presenta ningún tipo de comunicación con el exterior [26]. La porosidad es uno de los parámetros más importantes que intervienen en el proceso de degradación de los materiales; la resistencia de una roca a los procesos de deterioro depende de su comportamiento frente al agua, sea en forma líquida, de vapor o hielo, y por tanto de las características del sistema poroso que va a influir en la capacidad de absorber agua del exterior o de la simple humedad presente en la atmósfera [6, 27]. Por lo anterior, se puede entender que el aumento de la porosidad conectada en un material permite la entrada y la acción de agentes degradantes que lo deterioran y disminuyen su capacidad de resistencia mecánica.

La absorción de agua se puede entender como el porcentaje de espacios vacíos intercomunicados en un volumen de roca, las rocas con alta absorción de agua presentan aumento en la masa específica aparente saturada, pero tienden a disminuir su capacidad de resistir a esfuerzos de compresión y flexión [6]. Es posible deducir que los valores de los índices físicos están íntimamente relacionados. Así, a menor densidad, mayor será la cantidad de espacios vacíos y por tanto la porosidad aparente de la roca. Cuanto mayor sea la porosidad abierta o conectada, mayor será la absorción de agua en la roca y menor su resistencia fisicomecánica [6].

Resistencia a la compresión uniaxial: El ensayo de resistencia a la compresión simple es el ensayo más utilizado para determinar la resistencia mecánica de las rocas ornamentales; por medio de este ensayo es posible clasificar una roca por el valor de su resistencia y determinar su deformabilidad [25]. La resistencia a esfuerzos de compresión que poseen las diferentes variedades de rocas está directamente relacionada con el

grado de alteración y discontinuidades existentes en cada uno de los materiales [6].

Según las especificaciones de la ASTM, la resistencia a la compresión simple mínima exigida para una cuarzoarenita usada para edificación es de 13,8 MPa [25]; en la tabla 2 se muestran valores de: densidad aparente seca ($\rho_{a,sec}$ (g/cm³)), absorción de agua (α_a (%)) y resistencia a compresión (R (MPa)) de rocas calizas.

Tabla 2. Especificaciones de valores para rocas calizas destinadas a revestimientos.

Tipo de Caliza	$\rho_{a,sec}$ (g/cm ³)	α_a (%)	R MPa
Baja densidad	1,76/2,16	<12	>12
Media densidad	2,16/2,56	<7,5	>28
Alta densidad	>2,56	<3,0	>55

Fuente: [28].

Módulo de ruptura: uno de los ensayos que se emplea frecuentemente para determinar la resistencia a tracción de las rocas es el de flexión. Este permite determinar la tensión de rotura de una placa de roca cuando es sometida a esfuerzos de tracción, valor que va a determinar el mejor tamaño y espesor de una placa que va a ser utilizada en unas condiciones estructurales y climáticas en particular. Es un ensayo fundamental, al utilizar placas en revestimientos exteriores, ya que estas estarán sujetas a fuerzas producidas por la acción del viento [18, 23]. Por otro lado, el valor del módulo de ruptura es fundamental para definir las dimensiones correctas de una placa de roca que va a ser usada en pavimentos, especialmente en lugares de alto tráfico peatonal o vehicular, y para que el diseñador del pavimento pueda determinar el método de soporte adecuado. El uso de placas con dimensiones diferentes puede ocasionar rápidamente agrietamiento y vuelco; por esto, las placas de roca usadas en revestimientos deben tener un espesor mínimo de 3 cm. La resistencia a la flexión es una propiedad que puede variar dependiendo de la orientación de la carga aplicada y si las muestras se ensayan en estado húmedo o seco [29].

De acuerdo con resultados de investigación sobre propiedades mecánicas de las litologías más frecuentes en los macizos rocosos, la resistencia a la flexión de calizas varía entre 3 MPa a 9 MPa [23]. Según la ASTM C 99, calizas con uso como rocas ornamentales y de revestimiento en las construcciones se pueden dividir en tres grupos: calizas de baja densidad que presentan valores de resistencia a la flexión mayores a 2,9 MPa, de media densidad mayores a 3,4 MPa y de alta densidad mayores a 6,9 MPa [28].

Cabe mencionar que un sistema de fachada al igual que un sistema de pavimentación debe diseñarse de acuerdo con sus condiciones de servicio, para asegurar su vida útil. Uno de los más importantes parámetros a determinar en el momento del diseño debe ser el sistema de fijación de las placas, debido a que un problema en el anclaje será la principal causa de daño y fracaso del revestimiento [30].

Resistencia al desgaste por abrasión: El desgaste es la propiedad que una roca posee para resistir la remoción progresiva de constituyentes de su superficie [1]. El ensayo de resistencia al desgaste abrasivo Amsler permite determinar dicha propiedad, simulando en laboratorio las condiciones de fricción en un pavimento o piso debidas al tráfico de personas o vehículos. Esta propiedad está estrechamente relacionada con la porosidad de la roca, la dureza de los minerales constituyentes (Escala de Mohs) y con el grado de alteración; es decir, las rocas menos alteradas, menos porosas y constituidas por minerales de mayor dureza serán las que presentan menos problemas de desgaste [6]. De acuerdo con resultados de investigación sobre resistencia al desgaste, se aceptan para areniscas con uso como rocas ornamentales en las obras civiles valores de desgaste entre 18 mm y 50 mm, mientras que para las calizas se pueden aceptar valores entre 17 mm y 20 mm [31, 32]

Resistencia al impacto: la resistencia al impacto o choque es la propiedad que define la tenacidad de un material para soportar grandes impactos. Debe ser evaluada especialmente en rocas que van a ser utilizadas en obras de construcción expuestas a cargas dinámicas de gran impacto, como pavimentos exteriores e interiores, peldaños y escaleras o en plazoletas destinadas a la realización de enormes eventos que reúnan una gran cantidad de personas, con el fin de determinar el espesor adecuado que deben tener las placas de roca del sistema de pavimentación, de tal manera que resista las cargas a las que va a ser expuesta durante su vida de servicio. Algunos trabajos en los que se ha estudiado la resistencia al impacto en calizas con uso en las edificaciones definen que la altura de rotura para estas rocas se encuentra entre 21 y 27 cm [31].

2. Materiales y métodos

Para el presente trabajo se eligieron dos tipos de rocas de amplia utilización como material de revestimientos internos y externos y acabados en edificios patrimoniales de la ciudad de Bogotá y en construcciones recientes. El primero corresponde a una roca arenisca, comercializada con los nombres de “piedra muñeca” o “piedra

bogotana”, explotada en diversas canteras cercanas a la ciudad. La segunda es una roca caliza, comercializada con el nombre de “mármol royal broce”, explotada en canteras del departamento de Córdoba y que ha sido utilizada en construcciones contemporáneas de la ciudad de Medellín [6] y cuyo uso se ha extendido a todo el país, especialmente en edificios, vías peatonales del centro histórico y en algunas estaciones de Transmilenio en la ciudad de Bogotá. Sobre estos dos materiales se identificaron los procesos patológicos más comunes y frecuentes en columnas, ventanas, fachadas y elementos decorativos de algunos edificios históricos y en vías de circulación peatonal del centro de Bogotá.

La segunda etapa es el desarrollo de trabajo de laboratorio, consistente en la determinación de algunas propiedades fisicomecánicas y mineralógicas de los dos tipos de rocas, realizado tanto en la Universidad Santo Tomás como en el laboratorio de tecnología de rocas (Labtec Rochas) adscrito al Instituto de Geociencias de la Universidad Federal de Minas Gerais (Brasil), aplicando métodos de ensayo estandarizados por normas internacionales de caracterización de la piedra natural.

Para efectos prácticos los dos tipos de rocas se van a nombrar en el resto del trabajo con la siguiente nomenclatura: **PM** (piedra muñeca) y **MRB** (Mármol Royal Bronce). La PM comercialmente se encuentra en dos variedades, una rosada y otra amarilla, las dos consideradas en este trabajo e identificadas con las siglas **PMR** (piedra muñeca rosada) y **PMA** (piedra muñeca amarilla).

El trabajo realizado fue parte de un proceso de aprendizaje académico desarrollado para conocer e implementar nuevos métodos de ensayo en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás (USTA) para la investigación de las rocas ornamentales ampliamente utilizadas en Colombia, especialmente en la Ciudad de Bogotá. Los resultados corresponden a la caracterización petrográfica y al análisis de las propiedades fisicomecánicas de los materiales PMA, PMR y MRB.

Los datos correspondientes al MRB fueron tomados de la investigación realizada en el Labtec Rochas de la UFMG [6].

2.1. Etapa 1: trabajo de Campo

Una vez elegidos y localizados los materiales PM y MRB se empieza con la observación de los procesos de deterioro presentes en ellos; este trabajo se evidencia con un registro fotográfico de algunas construcciones

históricas de la ciudad de Bogotá y el reconocimiento de cada patología (Figura 5, 6 y 7). La terminología usada para la descripción de daños o lesiones en los materiales identificados en la etapa de campo es la expuesta por Fitzner, Heinrich y La Bouchardiere y actualizada en el glosario ICOMOS [33, 34].

2.1.1. Observación de formas de deterioro

Siguiendo la nomenclatura de Fitzner, Heinrich y La Bouchardiere, las formas de deterioro que se logran identificar con mayor frecuencia son los siguientes: grietas, como fracturas (Fra) y fisuras (Fis); formas de desprendimiento, como estallido (E), ampollas (Am) y disyunción de películas (DP); disgregación, como pulverización (P) y arenización (Ar); formas de fragmentación, como desconchadura (Des); formas de erosión, como redondeamiento (R) y erosión diferencial (ED); daños de origen mecánico, como abrasión (Ab); alteraciones cromáticas, como costra negra (CN), mancha de humedad (MH), eflorescencia (Ef), graffiti (G), enmugrecimiento (Enm) y depósito (Dep); y colonización biológica de algas (Al).

2.2. Etapa 2: trabajo de laboratorio

Muestras representativas de los materiales PM y MRB se sometieron a los siguientes ensayos: análisis petrográfico, índices físicos, resistencia a la compresión uniaxial, resistencia a la flexión por carga en cuatro puntos, resistencia al impacto y resistencia al desgaste por abrasión.

En el desarrollo del trabajo experimental se presentaron algunas dificultades; una de estas fue la imposibilidad de transporte de las probetas de la PM al LABTECROCHAS de la UFMG, Brasil. Para estas muestras se realizaron ensayos en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil de la USTA, Bogotá. La elaboración de probetas de acuerdo con las especificaciones de las normas internacionales se dificultó por no contarse en Bogotá y sus alrededores con empresas especializadas que realicen este tipo de dimensionamiento. Las probetas del MRB utilizadas corresponden a los usadas por J. Becerra en su tesis de doctorado [6].

Los ensayos se realizaron siguiendo la norma ABNT NBR 15845 de 2010 [35]; el ensayo de desgaste se hizo según los procedimientos indicados en la norma ABNT NBR 12042 de 1992 [36].

A continuación, se evidencia el trabajo de laboratorio realizado en la Universidad Santo Tomás y en el LabtecRochas de la Universidad Federal de Minas Gerais

a través de una muestra fotográfica de cada uno de los ensayos implementados a los materiales elegidos en esta investigación.



Figura 5. Identificación de procesos patológicos en la PM utilizada en la fachada de la Iglesia de la Candelaria en Bogotá, Colombia. Fisuras (Fis), ampollas (Am), redondeamiento (R), erosión diferencial (ED), alteración cromática como costra negra (CN), mancha de humedad (MH) y colonización biológica de algas (Al). Fuente: elaboración propia.

2.2.1. Análisis petrográfico

Las observaciones al microscopio se realizan de acuerdo con el numeral (A) de la norma NBR 15845, en el laboratorio de la Universidad Santo Tomás, usando un microscopio ZEISS SCOPE A1. Las observaciones realizadas tienen como único fin determinar algunos parámetros de textura y composición relacionadas con el comportamiento mecánico y la durabilidad de las rocas analizadas. Entre estos aspectos se consideran la composición mineralógica y características de redondez, selección, madurez y porosidad, la cual se observa por el contraste de luz marcado por las resinas coloreadas, de muestras correspondientes a las rocas PMR y PMA.

2.2.2. Índices físicos

El ensayo de índices físicos se realiza a partir de las especificaciones del numeral (B) de la norma NBR

15845. Estos ensayos se realizaron tanto en la Universidad Santo Tomás para las rocas PMR y PMA como en el LabtecRochas para la roca MRB. Cabe anotar que el ensayo hecho en la USTA existió varias limitaciones debido a que no se contó con el suficiente número de probetas, el proceso de corte no permitió obtenerlas de dimensiones exactamente iguales, ya que no se cuenta en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería de la USTA con todos los equipos necesarios para la realización de este ensayo tal y como lo especifica la norma.

a la compresión uniaxial en las areniscas se ve afectado por la mínima cantidad de probetas disponibles, asimismo, cabe aclarar que para las PM el ensayo se aplica en estado seco y húmedo mientras que en la MRB solo se aplica a probetas en estado seco.

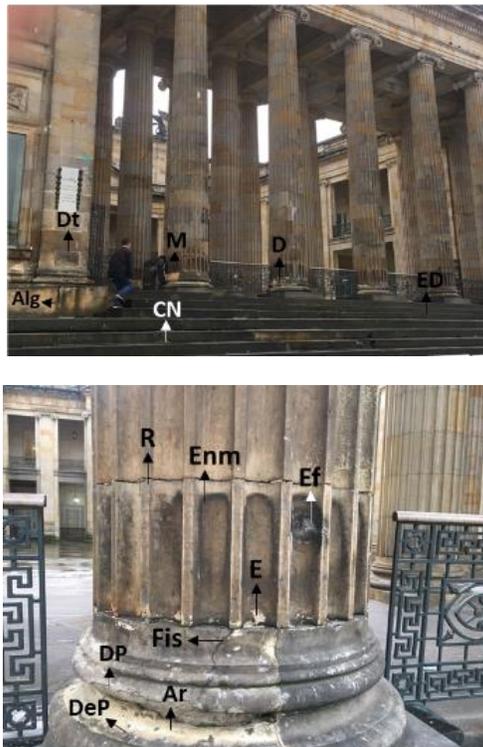


Figura 6. Formas de deterioro en la PM utilizada en la fachada y como elemento estructural del Capitolio Nacional en Bogotá, Colombia. Fisuras (Fis), estallido (E), disyunción de películas (DP), arenización (Ar), redondeamiento (R), costra negra (CN), enmugrecimiento (Enm), depósito (Dep) y algas (Al). Fuente: elaboración propia.



Figura 7: Formas de deterioro en la MRB utilizada en el sendero peatonal de la carrera séptima desde la Plaza de Bolívar hasta Av. Jiménez en Bogotá, Colombia. Fisuras (Fis), fracturas (Fra) y redondeamiento (R). Fuente: elaboración propia.

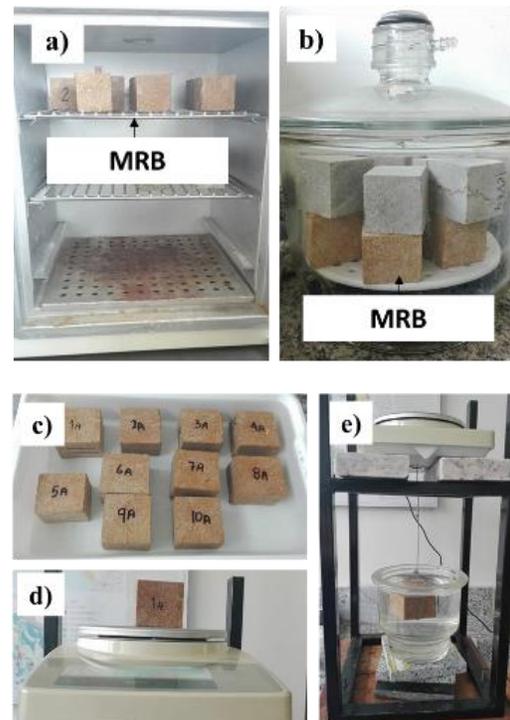


Figura 8. Muestra fotográfica de ensayo de índices físicos aplicado a MRB en LabtecRochas. a) Secado del material. b) Enfriamiento del material. c) Proceso de absorción. d) Pesaje de probeta saturada. e) Pesaje de probeta sumergida. Fuente: elaboración propia.

2.2.3. Resistencia a la compresión uniaxial

Este ensayo se realiza siguiendo las especificaciones del numeral (E) de la norma NBR 15845 en la Universidad Santo Tomás para las PMR y PMA en el LabtecRochas para la MRB (figuras 8, 9 y 10). El valor de la resistencia

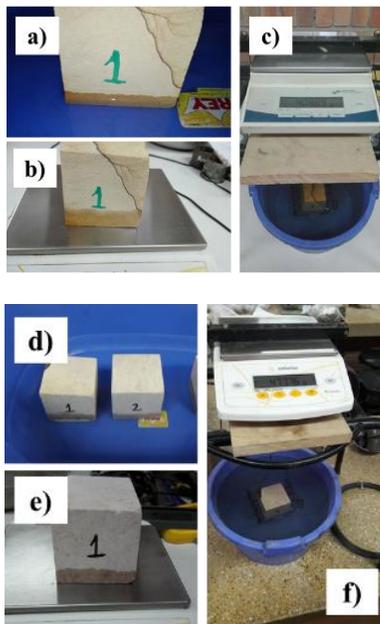


Figura 9. Muestra fotográfica de ensayo de índices físicos aplicado a PMA y PMR en Universidad Santo Tomás. a) Proceso de absorción muestra PMA. b) Pesaje de muestra PMA saturada. c) Pesaje de muestra PMA sumergida. d) Proceso de absorción muestra PMR. e) Pesaje de muestra PMR saturada. f) Pesaje de muestra PMR sumergida. Fuente: elaboración propia.

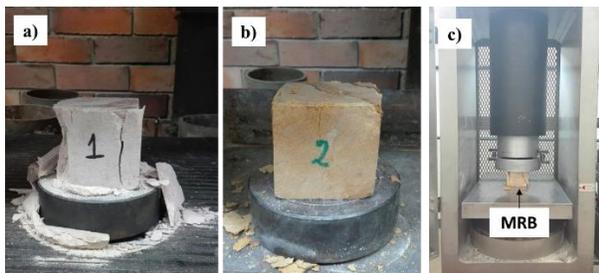


Figura 10. Muestra fotográfica de ensayo de resistencia a la compresión uniaxial aplicado a APMR, APMA Y CMR en Universidad Santo Tomás y LabtecRochas. a) Falla de probeta No.1 de APMR. b) Falla de probeta No.2 de APMA. c) Falla de probeta n.º 5 de CMR. Fuente: elaboración propia.

2.2.4. Resistencia a la flexión

Este ensayo (figura 11) se realiza siguiendo las especificaciones del numeral (G) de la norma NBR 15845 en el LabtecRochas – UFMG para la MRB.

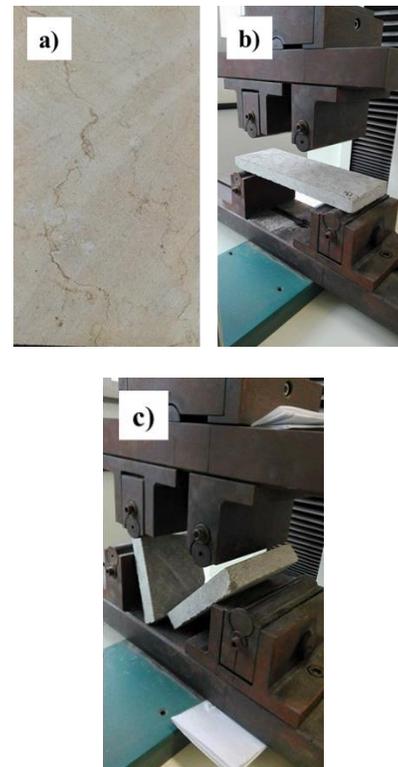


Figura 11. Muestra fotográfica del ensayo de Flexión aplicado a la MRB en el LabtecRochas. a) Probeta. b) Máquina y probeta dispuestas para el ensayo. c) Falla de la probeta. Fuente: elaboración propia.

2.2.5. Resistencia al impacto

Este ensayo se realiza siguiendo las especificaciones del numeral (H) de la norma NBR 15845 en el LabtecRochas para la MRB (figura 12).

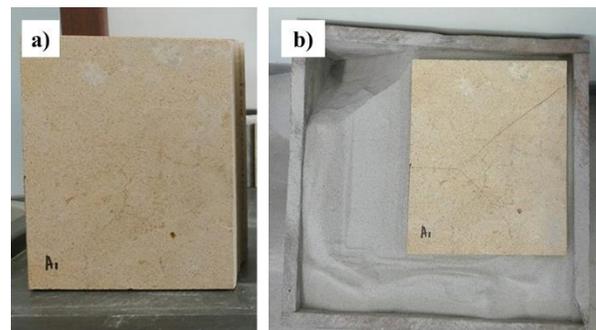


Figura 12. Muestra fotográfica del ensayo de Resistencia al impacto aplicado al MRB en el LabtecRochas, a) probeta, b) falla de la probeta. Fuente: elaboración propia.

2.2.6. Resistencia al desgaste por abrasión

El ensayo de resistencia al desgaste por abrasión se realiza a partir de las especificaciones del numeral (C) de la norma NBR 15845 en el LabtecRochas, este método se desarrolla tanto para las PMR y PMA como para la MRB (figura 13).

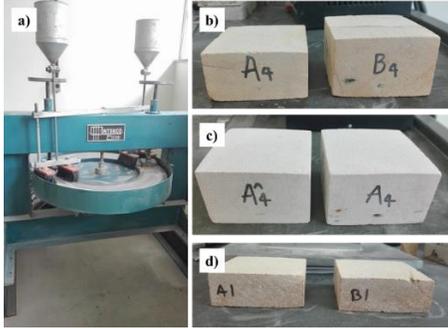


Figura 13. Muestra fotográfica del ensayo de Resistencia al desgaste por abrasión aplica a PMA, PMR y MRB en el LabtecRochas. a) Equipo utilizado en el ensayo para el desgaste de materiales. b) Probetas de PMA al final del ensayo. c) Probetas de PMR al final del ensayo. d) Probetas de MRB al final del ensayo.

Fuente: elaboración propia.

3. Resultados y análisis

En este numeral se exponen los resultados obtenidos de los métodos de ensayo propuestos para esta investigación.

3.1. Caracterización petrográfica

La PMR es una arenisca cuarzosa, con cantidades mínimas de fragmentos de roca y moscovita y escasa matriz entre sus granos. La roca es texturalmente submadura, con forma de granos subredondeados y bien seleccionados. Se observan diferentes tipos de contactos entre los granos, con predominio de los contactos planos (figuras 14 y 15). La roca presenta alta porosidad, que podría facilitar la entrada y circulación de fluidos.

La PMA es una arenisca de cuarzo; a diferencia de la PMR presenta fragmentos de roca en su esqueleto y matriz entre los granos. La roca es texturalmente submadura, con granos de forma subangular y moderadamente seleccionados. Se observan diferentes tipos de contactos entre los granos de flotantes a netos (figuras 16 y 17). La roca muestra alta porosidad, que podría facilitar la entrada y circulación de fluidos.

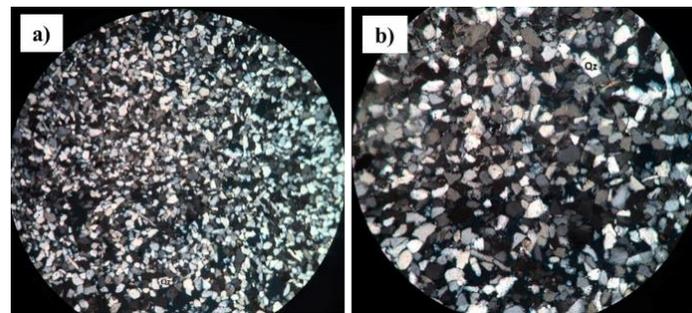


Figura 14. Observación de composición mineralógica y características texturales de PMR con nicoles cruzados. a) Imagen en 5X. b) Imagen en 10X. Fuente: elaboración propia.

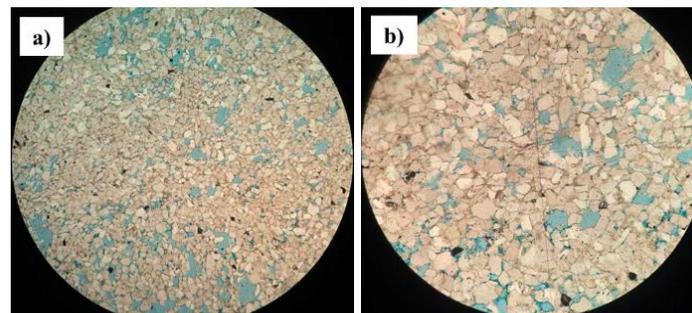


Figura 15. Observación de composición mineralógica y características texturales de PMR con nicoles paralelos. a) Imagen en 5X. b) Imagen en 10X. Fuente: elaboración propia.

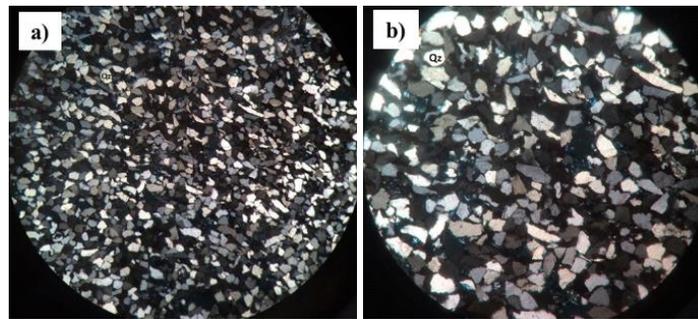


Figura 16. Observación de composición mineralógica y características texturales de PMA con nicols cruzados. a) Imagen en 5X. b) Imagen en 10X. Fuente: elaboración propia.

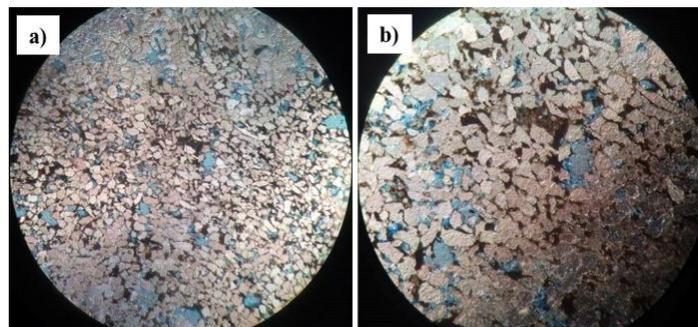


Figura 17. Observación de composición mineralógica y características texturales de PMA con nicols paralelos. a) Imagen en 5X. b) Imagen en 10X. Fuente: elaboración propia.

Las dos rocas PMR y PMA presentan buena madurez composicional, ya que se componen de cuarzo como mineral predominante. Son texturalmente submaduras, teniendo en cuenta la forma y el contacto de sus granos, la presencia de matriz y la selección, parámetros que condicionan su comportamiento físico y mecánico.

La porosidad también es un parámetro condicionante del desempeño de las rocas como materiales de construcción. Con el fin de analizar este parámetro en las dos variedades de rocas areniscas, se digitalizan los espacios vacíos visibles gracias a la aplicación de resinas y la observación de las fotografías obtenidas por microscopía (figura 18). De la observación de la fig. 18 se debe destacar el alto porcentaje de porosidad en las dos variedades de areniscas analizadas. En especial se pueden reconocer dos tipos de porosidad: «la conectada» y «la no conectada».

La PMA es la variedad que presenta la mayor porosidad y de la cual un alto porcentaje corresponde a porosidad conectada; presenta asimismo mayor cantidad de matriz que la PMR. La PMR es una roca con alto porcentaje de porosidad total distribuida en porosidad conectada y no conectada.

3.2. Caracterización fisicomecánica

En la tabla 3 se exponen los resultados obtenidos de algunos ensayos de caracterización tecnológica en los tres tipos de materiales seleccionados para este trabajo.

La alta porosidad de PMA y PMR facilita la absorción de fluidos, especialmente por la presencia de porosidad conectada; este parámetro provoca la alteración del material rocoso que con el paso del tiempo se deteriora y disminuye su durabilidad. Los parámetros mecánicos como resistencia a compresión, flexión y desgaste en las dos variedades tenderá a ser baja por el gran contenido de espacios vacíos; la cantidad de matriz presente en la PMA es un factor de especial importancia, ya que si se trata de una matriz compuesta por minerales arcillosos se empeora su capacidad de resistir esfuerzos mecánicos y los procesos de alteración aumentarán, pues una matriz compuesta por este tipo de minerales puede generar fisuración de la estructura interna de la roca [23].

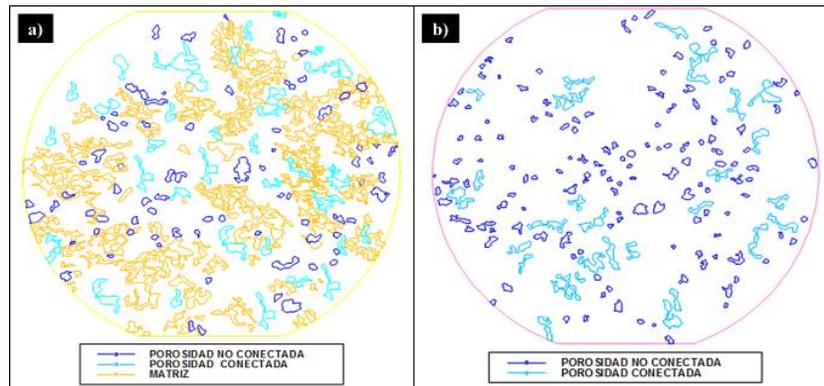


Figura 18. Digitalización detallada de poros en las dos variedades de areniscas en estudio. a) PMA. b) PMR.
Fuente: elaboración propia.

3.2.1. Análisis de propiedades petrofísicas

Los resultados que se exponen en la tabla 3 reflejan la relación directa que existe entre los principales componentes petrográficos de una roca (textura, estructura y mineralogía) y el comportamiento petrofísico de esta [38]. Los materiales con mayor absorción de agua son aquellos que presentan alta porosidad con alto grado de interconexión entre los poros saturados, es decir, la existencia de un porcentaje considerable de porosidad abierta o conectada. El elevado porcentaje de absorción de agua es un parámetro fundamental en el desarrollo de procesos patológicos y por consiguiente en el alto grado de alterabilidad en los materiales. El coeficiente de absorción es un valor dependiente y directamente relacionado con la porosidad abierta.

De los tres materiales en estudio, la PMA es la roca que presenta mayor porcentaje de absorción de agua (7,69 %), de acuerdo con las observaciones en el microscopio, gran parte de sus poros son conectados, es decir, existe un alto porcentaje de porosidad abierta en la roca. La PMR, de menor porosidad que la PMA, muestra un porcentaje menor de absorción de agua; no obstante, presenta un alto porcentaje de porosidad abierta. De los tres materiales, el MRB es el que presenta menor porosidad y menor porcentaje de absorción de agua (3,39%) respecto a los otros dos materiales, de lo cual se puede inferir que un alto porcentaje de esos espacios vacíos son no conectados.

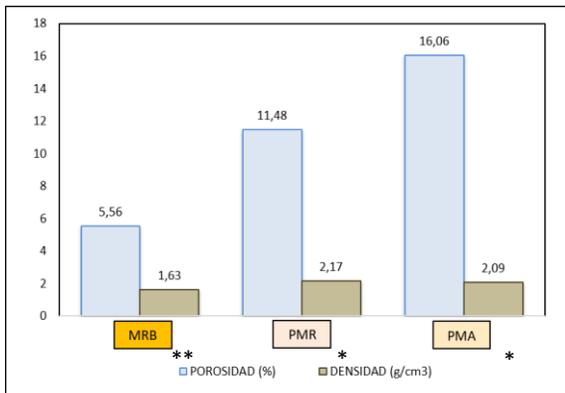
A través de los resultados de absorción de agua, se observa que las tres variedades analizadas presentan altos valores de porosidad abierta, comunes en este tipo de materiales [24].

En la gráfica 1 se muestra la relación entre los parámetros de densidad y porosidad, estrechamente relacionados con la mineralogía y estructura de las rocas. A pesar de que las rocas PMA y PMR están compuestas de cuarzo como mineral predominante y presentan buena selección granulométrica, muestran asimismo diferencias en su estructura de poros; la porosidad es mayor en PMA y su densidad o masa específica menor, lo cual influye directamente en sus características de resistencia mecánica.

Tabla 3. Resultados de ensayos de caracterización tecnológica realizados en la Universidad Santo Tomás y en el LabtecRocha

Ensayos de caracterización tecnológica		PMR	PMA	MRB
Índices Físicos	Densidad Aparente Seca $\rho_{a_{sec}}$ (g/cm ³)	2.17*	2.09*	1.63**
	Densidad aparente Saturada $\rho_{a_{sat}}$ (g/cm ³)	2.28*	2.25*	1.69**
	Porosidad Aparente Φ_a (%)	11.48*	16.06*	5.56**
	Absorción de Agua α_a (%)	5.30*	7.69*	3.39**
Resistencia a la compresión Uniaxial (MPa)	Saturada	47.34*	10.41*	45.54**
	Seca	67.08*	16.28*	
Resistencia a Flexión 4 Puntos (MPa)		--	--	9.63*
Desgaste abrasivo Amsler (mm/1.000m)		7.82*	8.71*	6.6**
Resistencia al Impacto	Altura de rotura (m)	--	--	0.25*

Fuente: *Propios. **Becerra [6].



Gráfica 1. Correlación entre la porosidad total y la densidad de los materiales en estudio. Fuente: *Propios. **Becerra [6].

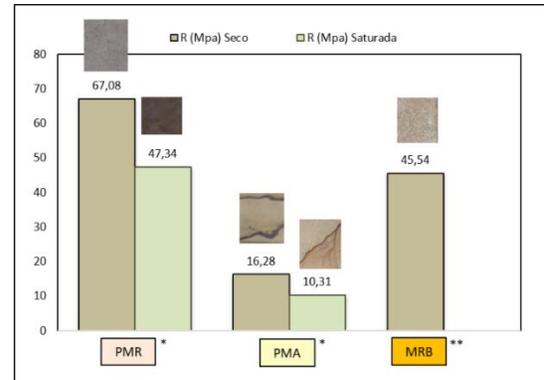
3.2.2. Comportamiento mecánico

Resistencia a la compresión: los resultados de resistencia a la compresión obtenidos para las dos variedades de areniscas y la caliza en estudio permiten demostrar la gran incidencia que tienen las propiedades petrográficas y físicas en el comportamiento mecánico de los materiales.

Cabe resaltar que el grado de alteración y la presencia de discontinuidades de cada probeta es una condicionante fundamental en los resultados de resistencia a la compresión. Algunas probetas de PMA muestran evidencias de alteración y presentan algunas discontinuidades semejantes a anillos de Liesegang [40] que afectan en gran medida su capacidad de resistir a esfuerzos de compresión. En la gráfica 2 se observa que el valor de la resistencia a la compresión varía dependiendo del estado en que se encuentren las probetas (seco o saturado); la PMR, al encontrarse en estado seco, presenta una resistencia de 67,08 MPa mientras que en estado saturado registra una resistencia de 47,34 MPa, por lo que su capacidad de resistir esfuerzos de compresión disminuye aproximadamente 30 %, asimismo, la PMA disminuye su resistencia en un 37 %, ya que en estado seco soporta cargas hasta de 16,28 MPa mientras que en estado saturado su resistencia cae hasta 10,31 MPa.

El MRB es un tipo de caliza de baja densidad, ya que su densidad aparente seca se encuentra entre 1,76 y 2,16 g/cm³, su absorción de agua es menor al 12 % y su resistencia a la compresión mayor a 12 MPa (ver tab. 2) Por otro lado, los valores obtenidos de resistencia a la compresión de la PMR (67,08 MPa) y PMA (16,28 MPa) al ser ensayadas en estado seco son mayores al mínimo permitido por la ASTM para rocas usadas en edificación

(13,8 MPa), sin embargo, en el caso de la PMA al ensayarse totalmente saturada muestra una resistencia menor a este valor [28].



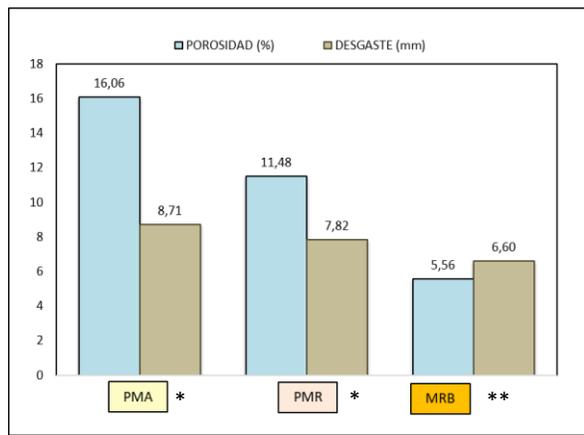
Gráfica 2. Comparación de los valores de resistencia a la compresión (R (MPa)) en probetas en estado seco y en estado saturado. *Propios. **Becerra [6].

Resistencia a la flexión: El resultado obtenido en el ensayo de resistencia a la flexión para el MRB fue de 9,63 MPa, valor que se encuentra dentro del rango establecido por algunos resultados de investigación para distintos tipos de calizas (3 MPa - 9 MPa) siendo aún mayor [23]. Este resultado de flexión permite corroborar que el MRB es una caliza de baja densidad, ya que su resistencia a la flexión (9,63 MPa) es mayor a 2,9 MPa tal y como lo especifica la ASTM C170 para rocas que van a ser usadas en las construcciones civiles para fachadas o pisos [28]. Cabe mencionar que las dimensiones de ancho, largo y espesor de las placas de MRB usadas para este ensayo fueron modificados de los estrictamente especificados en la norma. A pesar de esto, los resultados son válidos considerando que se siguen las recomendaciones de la norma ABNT NBR 15845, Anexo G, que permite que puedan ser utilizadas para el ensayo probetas con el espesor de uso de la placa, desde que el ancho sea mínimo de 1,5 veces el espesor y el largo sea de 10 veces el espesor. La longitud de las probetas debe exceder el tamaño del largo mínimo en 3 cm y máximo en 5 cm para cada extremo. Se utilizaron las probetas con dimensiones de 9cm, 24 cm y 2 cm (ancho, largo y espesor) que cumplen lo recomendado en la norma.

Resistencia al desgaste: Los resultados de resistencia al desgaste obtenidos para las dos variedades de areniscas y la caliza en estudio permiten demostrar la gran incidencia que tiene la porosidad y el grado de alteración en el desgaste de un material (gráf. 3).

Es posible afirmar que los valores de resistencia al desgaste obtenidos para la PMA (8,71 mm) y la PMR

(7,81 mm) son buenos para su uso como rocas de revestimiento, ya que son menores a 18 mm; la MRB también presenta buena resistencia al desgaste, ya que su valor (6,58) es menor a 17 mm. Las tres rocas pueden ser usadas como materiales para la pavimentación de calles y plazoletas en exteriores e interiores y para el revestimiento de pisos exteriores e interiores [31]. Sin embargo, se debe hacer un continuo mantenimiento del material y, si es posible, a la hora de ser instalado se le debe hacer la aplicación de diversos tratamientos de protección [39].



Gráfica 3. Relación directa entre la porosidad y el desgaste. Fuente: *Propios. **Becerra [6].

Resistencia al impacto: El resultado de resistencia al impacto o choque obtenido para el MRB fue de una altura de caída de 25 cm, valor que se encuentra en el rango definido para calizas con uso como roca ornamental en las edificaciones (entre 21 cm y 27cm) [31], de tal manera que el MRB es un material que puede ser utilizado en pisos exteriores e interiores, umbrales, escalones, mesas y acabados. No obstante, se deben evitar altos impactos en la roca para evitar agrietamientos o fisuras que permitan la entrada de agentes alterables. Su instalación y transporte debe ser de cuidado, pero no tan minuciosa como en otras rocas con el fin de prevenir daños.

4. Conclusiones

Bogotá se destaca por grandes obras de construcción patrimoniales y contemporáneas en las que se han utilizado diferentes tipos de rocas ornamentales, destacándose como ejemplos la “piedra muñeca” y el “mármol royal bronze”, que han sido materiales selectos para su uso en las obras civiles de la ciudad. En edificios patrimoniales donde estos materiales se han utilizado, se observa el desarrollo de diferentes procesos patológicos.

Siguiendo la nomenclatura de Fitzner, Heinrich y La Bouchardiere, las tipologías de procesos patológicos observados con más frecuencia fueron: alteración (A), degradación (D), deterioro (Dt) y meteorización (M). En detalle las patologías más frecuentes observadas son: fisuras (Fis), redondeamiento (R), ampollas (Am), costra negra (CN), mancha de humedad (MH), erosión diferencial (ED) y colonización biológica como algas (Alg).

De acuerdo con las observaciones microscópicas las areniscas PMA y PMR se caracterizan por su buena madurez composicional (cuarzo como mineral predominante), por ser texturalmente submaduras y presentar una alta porosidad especialmente porosidad conectada o abierta, factores que afectan su desempeño en las construcciones principalmente por la fácil absorción y circulación de fluidos, que a su vez provoca alteración en el material rocoso y disminución de su durabilidad.

Los valores de porosidad aparente (Φ_a), absorción de agua aparente (α_a) y densidad aparente ($\rho_{a_{sec}}$), obtenidos para la PMA (Φ_a (16,06%), α_a (7,69 %), $\rho_{a_{sec}}$ (2,09 g/cm³)), PMR (Φ_a (11,48%), α_a (5,30 %), $\rho_{a_{sec}}$ (2,17 g/cm³)) y MRB (Φ_a (5,56%), α_a (3,39 %), $\rho_{a_{sec}}$ (1,63 g/cm³)) permiten establecer que estas rocas al tener altos porcentajes de porosidad y absorción de agua facilitan la circulación de fluidos a su través, lo cual permite el desarrollo de un proceso de degradación en el material rocoso que disminuye su densidad. Los agentes degradantes que han podido entrar en el material rocoso lo deterioran y hace que estas tres rocas disminuyan su capacidad de resistir a fuerzas mecánicas, por lo que se vuelve menos durable.

La arenisca PMA al presentar los más altos porcentajes de porosidad y absorción de agua y el menor valor de densidad debe ser utilizada preferiblemente en espacios interiores alejados de cualquier tipo de agente contaminante que la pueda afectar, especialmente cuando ha de ser utilizada como elemento estructural en alguna obra de manera que su capacidad de soporte no disminuya. La PMR y el MRB pueden ser usadas tanto en exteriores como en interiores, ya que presentan mejores valores de porosidad aparente, densidad aparente y absorción de agua, siempre y cuando sean proyectadas y diseñadas en dimensiones y espesores apropiados.

La PMA es una roca submadura, con contenido de matriz entre los granos de cuarzo constituyentes y en la cual existe un alto porcentaje de espacios vacíos, la mayor parte de ellos conectados; estas dos características (matriz y porosidad) determinan el valor de la resistencia

a la compresión, muy bajo en el caso de la PMA en comparación con las otras dos rocas analizadas. La PMR presenta mayor madurez textural, con escasa matriz, sus granos se encuentran muy unidos (contactos netos) y su porosidad es menor; por tal motivo sus condiciones para resistir a los esfuerzos de compresión son mejores e incluso mayores a los de la PMA y MRB. La MRB, a pesar de presentar el menor porcentaje de porosidad, muestra menores valores de resistencia a la compresión que la PMR, debido a que es una roca caracterizada por presentar evidencias de meteorización desarrollada en las fisuras abundantes y con alto grado de conexión. La roca está constituida por una gran diversidad de bioclastos, aspecto que, junto con las discontinuidades, generan diferencias puntuales en su resistencia.

Los resultados de resistencia a la compresión simple de las areniscas PMA (16,28 MPa) y PMR (67,08 MPa) al ser mayores a 13,8 MPa, y de la caliza MRB (45,54 MPa) al ser mayor a 28 MPa, indican que son rocas aptas para ser usadas como elemento estructural en las construcciones. Sin embargo, su uso debe ser preferiblemente en espacios interiores, con el fin de evitar la disminución de su resistencia por la acción del agua y de otros agentes de alteración. La PMA al ser una roca altamente porosa (16,06 %) presenta la menor resistencia mientras que la PMR y el MRB con porosidades entre 10 % y 12 % muestran mejores valores de resistencia a la compresión.

Los valores de resistencia a la compresión en estado seco en las tres rocas analizadas muestran que son aptas para uso en peldaños y mampostería, es decir, que pueden servir en las obras de construcción como elementos estructurales; sin embargo, es importante tener en cuenta que son tendientes a disminuir su durabilidad, por lo que es necesario hacerle seguimiento a su estado de conservación para trabajos de rehabilitación. Las dos rocas, PMA y PMR, por sus propiedades petrográficas y físicas, muestran una disminución en su comportamiento mecánico al estar en estado saturado, por lo cual su utilización debe ser preferiblemente en espacios interiores, alejados de agentes de alteración que provoquen disminución en su resistencia, como, por ejemplo, ambientes de alta salinidad o con gran circulación de fluidos.

La resistencia a la flexión del MRB (9,63 MPa), catalogado como caliza de baja densidad, es mayor que el valor mínimo establecido en la norma ASTM C170 de 2,9 MPa.

El resultado de la determinación del módulo de ruptura muestra que una placa de MRB con un espesor de 2 cm puede ser utilizada en pavimentos con alto tráfico

vehicular o peatonal y en aquellos revestimientos exteriores expuestos a fuertes fuerzas generadas por la acción del viento. No obstante, para cada solicitud de uso, se recomienda evaluar el espesor de las placas y se aconseja mantener un espesor mínimo, para placas o adoquines, de 3 cm como lo especifica la norma.

Este resultado es muy importante para indicar al diseñador del pavimento las condiciones que deberá presentar el sistema de soporte, con el fin de que la obra tenga una larga vida útil y trabaje en condiciones óptimas.

Los valores de resistencia al desgaste obtenidos para la PMA (8,71 mm), la PMR (7,82 mm) y el MRB (6,6 mm), indican que los tres son materiales aptos para su uso en pisos y vías de alto tráfico peatonal o vehicular, ya que sus valores son menores a los valores promedios de desgaste establecidos para este tipo de materiales, especialmente al ser utilizadas en trabajos de restauración o rehabilitación. No obstante, debe considerarse la evaluación del espesor de los adoquines o placas del sistema de pavimentación en cada situación de uso. Asimismo, es importante que durante su vida útil se haga un continuo mejoramiento del material y de ser posible se apliquen tratamientos de protección a la hora de ser instalado.

La resistencia al impacto del MRB (25 cm) indica que es un material apto para usar en pisos exteriores e interiores, umbrales, escalones, mesas y acabados. Sin embargo, se deben evitar altos impactos que produzcan agrietamientos o fisuras en las placas de roca instaladas y se dé paso a agentes de alteración.

El estudio de materiales potenciales para rocas ornamentales por medio de ensayos normalizados de caracterización tecnológica es de gran importancia en la ingeniería civil y arquitectura. Las propiedades petrofísicas permiten reconocer como será el comportamiento mecánico y la durabilidad de los materiales, la resistencia a la compresión determina la aptitud de un material como elemento estructural, la resistencia a la flexión ayuda a establecer los espesores mínimos que deben tener las placas de roca cuando van a ser utilizadas en un sistema de pavimentación o en fachadas, y las resistencias al desgaste y al impacto también permiten definir el espesor mínimo de placas de roca en pisos o calles de uso peatonal o vehicular que generan continuas cargas dinámicas.

Se sugiere avanzar en la investigación de estos materiales considerando en profundidad el análisis de la estructura de poros, el estudio de la dinámica de circulación de fluidos y la caracterización química y mineralógica

mediante la aplicación de técnicas avanzadas para identificar los factores que rigen la susceptibilidad al desarrollo de problemas patológicos y estudiar alternativas de tratamientos de protección en las rocas que permitan conservar sus características estéticas y sus propiedades petrofísicas y mecánicas.

Referencias

- [1] A. Gilberto Costa, M. Santos Campello, and V. Brugnara Pimenta, “Rochas Ornamentais E De Revestimento De Minas Gerais: Principais Ocorrências, Caracterização E Aplicações Na Indústria Da Construção Civil,” *Geonomos*, vol. 8, no. 1, pp. 9–13.
- [2] J. E. Becerra Becerra and A. G. Costa, “Especificaciones de uso de rocas ornamentales con base en ensayos de alteración acelerada,” *Ing. Investig. y Desarro. I2+D*, vol. 6, no. 1, pp. 30–38, 2008.
- [3] A. J. Rodríguez, “Mapa de Minerales Industriales Zonas Potenciales para Materiales de Construcción”, INGEOMINAS, Bogotá D.C., Memoria Técnica, RS3_02, 2002.
- [4] Ministerio de Minas y Energía de Colombia and Ingeominas, “Aprovechamiento De Materiales Lapidarios En La Sierra Nevada De Santa Marta, Departamentos Del Cesar Y La Guajira,” Bogotá D.C., 2004.
- [5] M. Vargas, “Caracterización Geológica Del Travertino Localizado Al Noroccidente Del Municipio De Pesca, Boyacá,” Universidad Nacional de Colombia, Bucaramanga, 2014.
- [6] J. E. Becerra Becerra, “Avaliação da susceptibilidade aos processos de degradação dos calcários ornamentais da Formação La Tampa, usados na construção civil de Medellín-Colombia,” Universidad Federal de Minas Gerais, 2009.
- [7] J. E. Becerra Becerra et. al, *Unidades geológicas con potencial para rocas ornamentales en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca y sur de Santander*. Boyacá, Cundinamarca, Sur De Santander, 2011.
- [8] J. Becerra, “Avances En Caracterización Físico-Mecánica De Las Lajas Rústicas Utilizadas En Caracterización Preliminar De Lajas Rusticas Utilizadas En Construcciones Patrimoniales De Los Departamentos De Boyacá Y Cundinamarca -Colombia,” in *III Congreso Iberoamericano Y XI Jornada Tecnicas De Restauracion Y Conservacion De Patrimonio*, 2013.
- [9] G. Pérez and A. Salazar, “Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe,” *Geol. Colomb.*, vol. 10, no. 0, pp. 6–85, Jan. 1978. doi: 10.15446/gc
- [10] J. Guerrero and G. Sarmiento, “Estratigrafía Física, Palinológica, Sedimentológica y Secuencial del Cretácico Superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero: Implicaciones en Exploración Petrolera,” *Geol. Colomb.*, vol. 20, no. 0, pp. 3–66, Jan. 1996. doi: 10.15446/gc
- [11] L. J. Cedeño, “Explotación de materiales de construcción”, MINMINAS-UPTC, informe técn., Dic. 2013.
- [12] J. Becerra, M. Guzmán, and J. Stiven Patiño Mesías, “Characterization Of Laminated Sandstones Used As Slabs In Heritage Buildings From Colombia,” in *V Global Stone Congress*, 2014. doi: 10.13140/RG.2.2.26412.87682.
- [13] C. Chiodi Filho, “Aspectos Técnicos E Econômicos Do Setor De Rochas Ornamentais,” Centro de Tecnologia Mineral CETEM, 1995.
- [14] O. Palencia Fajardo, “La Minería y su incidencia en el crecimiento económico del departamento del Huila-Colombia,” *RUDICS*, vol. 4, no. 6, pp. 86–91, 2013.
- [15] C. A. Rodríguez Talero, “Alternativas De Solución De Problemática Legal Y Ambiental De 10 Canteras En El Norte De La Sabana De Bogotá,” Bogotá D.C., 2016.
- [16] I. & export Brasil, “Sector Piedras Ornamentales Estudio de Mercado,” 2015.
- [17] PROCOLOMBIA, “El mundo invierte en Colombia, Inversión en materiales de construcción”, Gobierno de Colombia, Bogotá D.C., inform tecn., 2016.
- [18] A. de A. Pazeto and A. C. Artur, “Correlação Entre Comportamento Tecnológico E Propriedades Petrográficas Das Rochas Ornamentais Silicáticas Branco Galaxy, Ocre Itabira E Diamante Negro,” *Geociencias*, vol. 34, no. 4, pp. 828–847, 2015.
- [19] Universidad de Oviedo. (1993, Oct 02), Materiales de construcción, [En línea], Disponible: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Tema3.Materialesconstruccion.petrosnaturales.pdf>
- [20] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, “Cerámicos, Refractarios y Piedras Naturales no estructurales para uso em

construcción”, ICONTEC, Bogotá D.C., Comité 043, Acta 168, 2017.

[21] R. Fort González, “La piedra natural y su presencia en el patrimonio histórico,” *Enseñanza las ciencias la tierra*, vol. 17, no. 1, pp. 16–25, 2009.

[22] A. P. Meyer, E. Wernick, and A. C. Artur, “Características tecnológicas de granitos ornamentais: a influência da mineralogia, textura e estrutura da rocha. Dados comparativos e implicações de utilização,” in *I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais; II Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste*, 2002, pp. 13–19.

[23] L. Alejano and P. Rámirez Oyanguren, *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes (I)*. 2007.

[24] J. A. Rodríguez, “La porosidad como componente petrográfico: la porosidad de las rocas carbonatadas”, Dept. de geología (petrología y geoquímica), Universidad de Oviedo, Abr. 2006.

[25] D. Benavente, “Propiedades físicas y utilización de rocas ornamentales,” Alicante, 2006.

[26] F. A. L. Dullien, *Porous Media : Fluid Transport and Pore Structure.*, 2nd ed. Elsevier Science, 1991.

[27] B. F. Miglio, D. M. Richardson, T. S. Yates, and D. West, “Assessment of the Durability of Porous Limestones: Specification and Interpretation of Test Data in UK Practice,” in *Dimension Stone Cladding: Design, Construction, Evaluation, and Repair*, K. Hoigard, Ed. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2000.

[28] E. B. Frazão, A. R. da Silva, E. B. Quitete, and F. C. de Queiróz, *Tecnologia de rochas na construção civil*. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2002.

[29] E. A. Gerns, B. Wonneberger, and M. J. Sheffler, “Design and Selection of Exterior Granite Pavers,” in *Dimension Stone Cladding: Design, Construction, Evaluation, and Repair*, K. R. Hoigard, Ed. ASTM International, 2000.

[30] D. West and M. Heinlein, “Anchorage Pullout Strength in Granite: Design and Fabrication Influences BT - Anchorage Pullout Strength in Granite: Design and Fabrication Influences,” in *Dimension Stone Cladding: Design, Construction, Evaluation, and Repair*, K. Hoigard, Ed. ASTM International, 2000.

[31] L. M. Suárez del Río *et al.*, “Características tecnológicas de las rocas ornamentales de Asturias,” *Trab. Geol.*, vol. 23, 2002.

[32] K. Zoghalmi, D. Gómez-Gras, and M. P. de Luxán, “Intrinsic factors determining the physical behaviour and durability of the Miocene sandstones used to build the Zaghuan-Carthage aqueduct (Tunis),” *Mater. Construcción*, vol. 54, no. 276, 2004. doi:10.3989/mc.2004.v54.i276.254.

[33] B. Fitzner, K. Heinrichs, and D. La Bouchardiere, “Weathering damage on Pharaonic sandstone monuments in Luxor-Egypt,” *Build. Environ.*, vol. 38, no. 9, pp. 1089–1103, 2003. doi: 10.1016/S0360-1323(03)00086-6.

[34] ICOMOS-ISCS, *Illustrated glossary on stone deterioration patterns*. Champigny/Marne, France: ICOMOS, 2008.

[35] Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, *Rochas para revestimento - Métodos de ensaio*. 2010, p. 32.

[36] Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, *Norma para materiais inorgânicos*. ABNT, 1992.

[37] P. A. Scholle, *Memoir 28 A Color Illustrated Guide To Constituents, Textures, Cements, and Porosities of Sandstones and Associated Rocks*. Tulsa, Oklahoma, U.S.A: The American Association of Petroleum Geologists, 1979.

[38] R. M. Esbert, F. J. Alonso, and J. Ordaz, “La petrofísica en la interpretación del deterioro y la conservación de la piedra de edificación,” *Trab. Geol.*, vol. 28, pp. 87–95, 2008.

[39] O. Buj, J. Gisbert, and J. Gisbert, “Caracterización petrofísica de tres variedades comerciales de areniscas miocenas del valle del Ebro,” *Mater. Construcción*, vol. 57, no. 287, pp. 63–74, Aug. 2007. doi:10.3989/mc.2007.v57.i287.57.

[40] V. G. Ruiz De Argandoña, L. Calleja, L. M. Suárez Del Río, A. Rodríguez-Rey, and C. Celorio, “Durabilidad en ambientes húmedos de la Arenisca de la Marina (Formación Lastres, Jurásico Superior de Asturias),” *Trab. Geol.*, vol. 25, pp. 105–115, 2005.