

Travertinos de la cantera San Antonio, municipio de Villa de Leyva - Colombia. Avances en Caracterización física y mineralógica para su uso como roca ornamental

Travertines of the Cantera San Antonio,
municipality of Villa de Leyva - Colombia.
Advances in physical and mineralogical
characterization for use as an ornamental rock.

Travertinos do Cantera San Antonio, município de Villa
de Leyva - Colômbia. Avanços na caracterização física
e mineralógica para uso como rocha ornamental.

Gerardo Alexander Buitrago Cárdenas

Ingeniero Civil. Universidad Santo Tomás – Seccional Tunja.
Correo electrónico: gerardo.buitrago@usantoto.edu.co. Tunja – Colombia.

Javier Eduardo Becerra Becerra

Geólogo. Universidad Nacional de Colombia-UNAL.
Doctor PhD y Magíster M. Sc en Geología Economía y Aplicada.
Universidad General de Minas Gerais (Brasil).
Docente Investigador. Facultad de Ingeniería Civil.
Universidad Santo Tomás – Seccional Tunja.
Correo electrónico: javier.becerra@usantoto.edu.co. Tunja-Colombia.

Resumen

Este artículo muestra los resultados de la caracterización física, mecánica y mineralógica del travertino, extraído en la cantera San Antonio, Villa de Leyva, utilizado desde hace más de cincuenta años, con fines arquitectónicos, uso en cimentaciones, columnas y otros elementos estructurales, entre otros.

El material es evaluado mediante la aplicación de normas NBR y UNE-EN, de caracterización de rocas ornamentales. Se evaluaron las características de composición mineralógica mediante observaciones al microscopio petrográfico y las propiedades de densidad aparente, porosidad abierta aparente, absorción de agua aparente, permeabilidad, absorción de agua por capilaridad y resistencia a la compresión. Los anteriores ensayos se hicieron con el fin de determinar, de forma preliminar, las características que definen su uso como roca ornamental y su correcta implementación en obra.

La roca estudiada es un travertino, de origen sedimentario, compuesto por calcita (CaCO_3), con cantidades menores de óxidos de hierro, la cual aparece en forma de micrita (lodo calcáreo) como constituyente de la matriz y en cristales definidos de esparita como cementante o aun como material de relleno de algunas fisuras. Los resultados de los ensayos indican que el travertino presenta una densidad aparente seca de $2,51 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, densidad aparente saturada de $2,61 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, porosidad de 9,05%, absorción de agua 3,62 %, coeficiente absorción de agua por capilaridad de $24,14 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$ y resistencia a la compresión de 16 MPa. El material cumple con las especificaciones de uso para revestimientos de muros internos y fachadas internas y externas.

Palabras clave: Travertino, calcita, caracterización, petrografía, propiedades hídricas, absorción capilar, compresión, fundações, colunas e outros elementos estruturais, entre outros. outros.

Para citar este artículo: Buitrago Cárdenas G.A. Becerra Becerra JE. "Travertinos de la Cantera San Antonio, municipio de Villa de Leyva-Colombia. Avances en caracterización física y mineralógica para su uso como roca ornamental". In *L'Esprit Ingenieux*. Vol. 9, p.p 10-28.

Abstract

This article shows the results of the physical, mechanical and mineralogical characterization of the travertine, extracted in the San Antonio quarry, Villa de Leyva, used for more than fifty years, for architectural purposes, use in foundations, columns and other structural elements, among others.

The material is evaluated through the application of NBR and UNE-EN standards for the characterization of ornamental rocks. The characteristics of mineralogical composition were evaluated by means of petrographic microscope observations and the properties of apparent density, apparent open porosity, apparent water absorption, permeability, capillary water absorption and compression resistance. The previous tests were made in order to determine, in a preliminary way, the characteristics that define its use as an ornamental rock and its correct implementation on site.

The rock studied is a travertine, of sedimentary origin, composed of calcite (CaCO_3), with smaller amounts of iron oxides, which appears in the form of micrite (calcareous mud) as a constituent of the matrix and in crystals of sparite defined as cementing or even as filling material for some fissures. The results of the tests indicate that travertine has a dry bulk density of $2.51 \text{ g / (cm}^3)$, saturated bulk density of $2.61 \text{ g / (cm}^3)$, porosity of 9.05%, absorption of 3.62% water, capillarity water absorption coefficient of $24.14 \text{ g / m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ and compressive strength of 16 MPa. The material meets the usage specifications for internal wall cladding and internal and external facades. Copyright © L'Esprit Ingenieux

Keywords: Travertine, calcite, characterization, petrography, water properties, capillary absorption, compression.

Resumo

Este artigo apresenta os resultados da caracterização física, mecânica e mineralógica do travertino, extraído na pedreira de San Antonio, Villa de Leyva, utilizada há mais de cinquenta anos, para fins arquitetônicos, uso em fundações, colunas e outros elementos estruturais, entre outros. outros.

O material é avaliado através da aplicação das normas NBR e UNE-EN para a caracterização de rochas ornamentais. As características da composição mineralógica foram avaliadas por meio de observações em microscópio petrográfico e as propriedades de densidade aparente, porosidade aparente aberta, absorção aparente de água, permeabilidade, absorção capilar de água e resistência à compressão. Os testes anteriores foram feitos para determinar, de forma preliminar, as características que definem seu uso como rocha ornamental e sua correta implementação no local.

A rocha estudada é um travertino, de origem sedimentar, composto de calcita (CaCO_3), com menores quantidades de óxidos de ferro, que aparece na forma de micrita (lama calcária) como constituinte da matriz e em cristais de esparita definidos como cimentantes ou mesmo como material de enchimento para algumas fissuras. Os resultados dos testes indicam que o travertino possui uma densidade aparente seca de $2,51 \text{ g / (cm}^3)$, densidade aparente saturada de $2,61 \text{ g / (cm}^3)$, porosidade de 9,05%, absorção de 3,62% de água, coeficiente de absorção de água da capilaridade de $24,14 \text{ g / m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$ e resistência à compressão de 16 MPa. O material atende às especificações de uso para revestimento interno de paredes e fachadas internas e externas. Direitos autorais © L'Esprit Ingenieux

Palavras-chave. Travertino, calcita, caracterização, petrografia, propriedades da água, absorção capilar, compressão.

INTRODUCCIÓN

Villa de Leyva es uno de los destinos turísticos más visitados del país, entre otros factores, por su arquitectura de tipo Colonial, reconocido por su gran plaza principal, calles empedradas y su distintiva arquitectura de tipo colonial, en cuya construcción se han utilizado diferentes clases de rocas, como areniscas y calizas. Entre estas últimas se destaca el travertino, usado también en grandes ciudades, como material de recubrimientos arquitectónicos, columnas, muros y además también en estructuras y cimentaciones.

En el año 1953, se empezó a desarrollar un proyecto de explotación de travertino en este municipio, que con el tiempo se fue convirtiendo en una de las empresas mineras líderes del país, al comercializar el material rocoso en bruto y procesado para la industria de la construcción, como baldosas para pisos, revestimientos de interiores y exteriores, además de elementos ornamentales. Su comercialización se hizo a nivel nacional e internacional, alcanzando cuotas importantes en mercados de países como Venezuela, Ecuador, Perú, Guatemala, Italia y Estados Unidos.

A partir de la primera década del siglo XXI, se presentó una representativa caída en las ventas del material, lo que afectó la actividad empresarial, dando como resultado un gran recorte de personal, algunos de los cuales continuaron con la explotación y transformación del travertino en empresas de menor escala. (Rodríguez E. , 2018).

El desempeño de las rocas en la construcción son influenciadas por múltiples factores externos o intrínsecos de los materiales, los cuales afectan su calidad estética ocasionando pérdida de brillo y cambios de coloración, y con el desarrollo de daños como exfoliación, fracturas, disolución mineral, que comprometen su resistencia mecánica y por consiguiente su durabilidad, con las consecuentes grandes pérdidas económicas a constructores, productores y comerciantes (Becerra J. , 2008). Es tarea de los ingenieros civiles como miembros de un equipo interdisciplinar, investigar las características y comportamientos frente a los requerimientos a los que se ven sometidos los materiales en obra. Por medio de ensayos de laboratorio, se obtiene información sobre composición mineral y propiedades tecnológicas, para evaluar las ventajas y/o desventajas del uso de los diferentes materiales pétreos en una obra de construcción y sus especificaciones, que permitan hacer el uso apropiado de los mismos.

Este artículo tiene como objetivo establecer las características físicas, mecánicas y mineralógicas del travertino explotado en la cantera de San Antonio del municipio de Villa de Leyva, con el fin de orientar el uso del mismo en obras civiles en elementos estructurales y arquitectónicos. Las propiedades se establecen a partir de ensayos de caracterización macroscópica, comportamiento ante la reactividad química, permeabilidad, caracterización mineralógica, determinación de la densidad aparente, porosidad aparente y absorción de agua aparente, absorción por capilaridad y resistencia a la compresión del material. (Valencia, 2009).

ESTADO DEL ARTE

El travertino

La palabra travertino proviene del latín, lapis tiburtinus ó “piedra de Tívoli” (una ciudad localizada 26 km al Este de Roma). Esta roca también es llamada tufa calcárea, basada en una caliza continental constituida por precipitaciones químicas cerca de manantiales, filtraciones, ríos,

arroyos, algunos lagos y compuesta de calcita y aragonito. La precipitación se muestra mediante transferencia de dióxido de carbono desde o hacia una fuente de agua subterránea que lleva hacia la sobresaturación de carbonato de calcio, con nucleación/crecimiento de cristales que ocurre en una superficie sumergida. (Pentecost, 2005)

Este material es reconocido por el sector de la construcción y es explotado, procesado industrialmente en usos de tipo ornamental como recubrimientos de exteriores e interiores y ocasionalmente en la construcción de columnas, muros y rellenos de cimentaciones. Sin embargo, solo se usan aquellas rocas que se consideran estéticamente bellas y que son suficientemente duras y resistentes para ser utilizadas en elementos estructurales o elementos decorativos. (Becerra J. , 2013)

Porosidad

La porosidad de un material pétreo se define como la relación entre el volumen total de poros y el volumen total de la roca. Se puede clasificar como porosidad abierta, al presentar cierto grado de interconexión con el exterior, de forma que un fluido puede ser transportado a su través.

La porosidad es una propiedad estática relacionada con la capacidad de almacenamiento de fluidos, y no una propiedad dinámica que relaciona la capacidad de flujo del sistema poroso. Por ello, la relación entre la porosidad y la permeabilidad puede llegar a ser baja. Por ejemplo, una pumita tiene una porosidad muy alta, sin embargo, la porosidad efectiva es cercana a cero, por lo tanto, la permeabilidad es despreciable. Por otro lado, las rocas fisuradas tienen una baja porosidad y sin embargo presentan una alta permeabilidad. (Benavente D. B., 2006)

Absorción Capilar

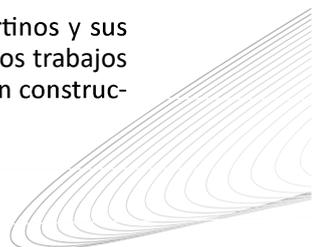
El transporte de agua por capilaridad es un mecanismo de gran importancia para rocas ornamentales, ya que permite analizar el comportamiento de transporte de fluidos dentro de la roca directamente relacionado con el tamaño de poro, con el fin de averiguar la velocidad de absorción, y coeficiente de absorción. La durabilidad de la roca puede ser afectada por la capacidad de absorción de agua, cristalización de sales, contaminación ambiental, migración de fluidos, etc. Con este ensayo se determina el nivel de susceptibilidad al deterioro al cual se encuentra expuesto. (Benavente D. B., 2006).

Resistencia a la Compresión

El ensayo de compresión es el ensayo más común para estimar la resistencia mecánica de las rocas. Dicho ensayo permite determinar la resistencia a compresión simple. El ensayo busca clasificar la roca por su resistencia y para la determinación de su deformabilidad. (Benavente D. B., 2006)

Antecedentes de investigación

En Colombia no se encuentran antecedentes de investigación de las rocas travertinos y sus propiedades para uso como roca ornamental. A nivel internacional, son diversos los trabajos que se han realizado sobre los travertinos como material de construcción usado en construcciones patrimoniales, citándose en las siguientes líneas los más importantes.



Fatah N. et.al., 2018, desarrolló su investigación doctoral sobre los fenómenos de meteorización que afectan las construcciones bizantinas de la república de Argelia en el norte de África, en cuyas construcciones se usaron travertinos. Identificó formas de meteorización como alveolización, eflorescencias, decoloración y erosión en forma de pérdida de material y arenización.

Benavente et.al., 2008, investigaron la influencia de las facies en las propiedades petrofísicas y de durabilidad del travertino clásico, explotado en Turquía y usado ampliamente en España como roca ornamental. Sus propiedades físicas (estructura de poros y sus propiedades hídricas, termales, acústicas y mecánicas), así como su resistencia a los ensayos de durabilidad corroboran el buen comportamiento de este travertino como roca ornamental. Su estructura y porosidad fenestral son las mayores causas de la anisotropía observada.

Urosevic et.al., 2010, estudiaron dos materiales de patrimoni o arquitectónico de Andalucía; calcarenita La Escribana y travertino Alfacar, ambos de Granada. Donde se caracterizan los materiales de reemplazo; calcarenita de Escúzar de Granada y travertino Olivillo de Alhama de Almería, mediante difracción y fluorescencia de rayos X, microscopias óptica y electrónica de barrido, ensayos hídricos, porosimetría de mercurio, adsorción de gases, pulsos ultrasónicos y parámetros cromáticos. El travertino Olivillo muestra un excelente comportamiento mecánico, sin embargo las propiedades físicas y cromáticas no son idóneas como material de sustitución.

Becerra, 2009, investigó la susceptibilidad a procesos de deterioro de calizas de la Formación La Tampa, de edad Oligoceno, utilizadas en la construcción de edificios recientes de la ciudad de Medellín. Sus observaciones se enfocaron en la porosidad como condicionante del deterioro observado, especialmente de la microporosidad como facilitador de los procesos de cristalización de sales, frecuentes en las grandes ciudades con ambientes contaminados y en los ambientes litorales, donde estas rocas han sido utilizadas.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El material estudiado es conocido como Travertino de Villa de Leyva. Este es extraído y distribuido directamente desde el municipio de Villa de Leyva; la cantera corresponde al título minero Lic.16730 y se encuentra en la vereda de Ruitoque alto, a 2 kilómetros del casco urbano de Villa de Leyva al oriente de la vía Villa de Leyva- Sáchica; el camino de acceso se encuentra a unos metros del puente de la quebrada Tabacal. El título minero cuenta con las coordenadas centrales 1060740 m.E y 1112444 m.N, un área de 90875m² y se encuentra comprendida entre las coordenadas indicadas en la Tabla 1.

La cantera se encuentra en la Formación Qtr (travertino), la cual corresponde a rocas sedimentarias calizas, de coloración gris-rojiza en muestra fresca y de coloración crema a pardo rojizo en muestras alteradas, con tamaño de grano arena media y en algunos casos cristales de calcita. El origen del travertino, probablemente está relacionado con procesos de enriquecimiento dentro del suelo que lo contiene o lo circunda, como también puede estar asociado con procesos termales, como lo evidencia un manantial de aguas tibias cargadas de sales, que se encuentra ubicado inmediatamente después del cruce del puente sobre el Río Samacá y en dirección a Sáchica. Se debe mencionar también la presencia, dentro de este depósito, de restos de mastodontes y otros vertebrados, los cuales se encuentran incluidos en la masa calcárea de color amarillo, que constituye el travertino, con un máximo de 15 m de espesor y la cual descansa angularmente sobre las lodolitas negras inferiores de la Formación Paja (Kip). Interiormente este travertino es muy poroso y presenta un aspecto pseudoestratiforme. (Patarroyo, 1997).

MATERIALES Y MÉTODOS

Actualmente, el Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC, se encuentra trabajando en la formulación de las normas de ensayo y caracterización de la piedra natural de uso no estructural (Comité 043). Al no contar con la normatividad necesaria para ensayos de caracterización de rocas ornamentales, se hace necesario recurrir al uso de normas extranjeras, de la ASTM (American Society of Testing Materials), UNE-EN (Normas establecidas por el comité europeo de normalización CEN y adoptadas en los países de la comunidad económica europea) y NBR-ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Los ensayos de laboratorio fueron los siguientes: Caracterización macroscópica, reactividad química, permeabilidad, caracterización mineralógica por petrografía, determinación de la densidad aparente, porosidad aparente y absorción de agua aparente, absorción de agua por capilaridad y compresión simple para estado seco y saturado.

La confección de las probetas para los ensayos realizados, se hizo de acuerdo a la norma utilizada o método para los mismos (Tabla 2).

Tabla 2. Dimensiones de las probetas de ensayo según normatividad.

NORMATIVA INTERNACIONAL O MÉTODO	ENSAYO	CANT. DE MUESTRAS	FORMA	TAMAÑO	
				Diámetro	Longitud
VISU	Caracterización Macroscópica	1	Cilíndrico	2"	4"
ESCALA DE MOHS (1824)					
NBR 13818	Reactividad Química (HCl)				
UNE 22-188	Caracterización mineralógica	2	Secciones delgadas	-	-
NBR12766	Determinación de la Densidad aparente, porosidad aparente y absorción de agua aparente	6	Cilíndrico	5 cm	5 cm
UNE-EN 1925	Absorción de agua por capilaridad	6	Cilíndrico	5 cm	5 cm
UNE-EN 22-185	Compresión simple, condición seca	14	Cilíndrico	5 cm	5 cm (10cm Norma)
	Compresión simple, condición saturada				

Caracterización macroscópica y reactividad química

El procedimiento de descripción macroscópica es realizado evaluando características físicas observables a simple vista de forma cualitativa. Algunos de los parámetros observados son los siguientes: color, dureza, composición mineralógica (minerales esenciales y accesorios), estado de oxidación y porosidad de la roca.

La dureza de la roca se determinó de forma cuantitativa relativamente mediante la escala de Mohs, con el fin de determinar la resistencia al rayado mediante minerales de referencia, con relación a la factibilidad o dificultad con la que un material es rayado por otro. Los minerales de la escala de Mohs que rayan el mineral desconocido son más duros, como los minerales que son rayados por el mineral desconocido son menos duros. Por tanto, la dureza del mineral desconocido se estrecha entre el nivel superior del mineral que puede rayarlo y el nivel inferior del mineral que es rayado por este mineral. (Griem, 2017). La escala clasifica diez tipos de minerales ordenados de forma ascendente por nivel de dureza.

La roca es sometida posteriormente al contacto con ácido clorhídrico (HCl), con el objetivo de identificar la presencia de calcita o dolomita de acuerdo con la intensidad de la efervescencia, es decir, el estado de oxidación y composición mineralógica. Cuando se pone en contacto el ácido clorhídrico con el carbonato de calcio (CaCO_3) se genera una reacción química con la producción de dióxido de carbono (CO_2) la cual se manifiesta como una efervescencia superficial.

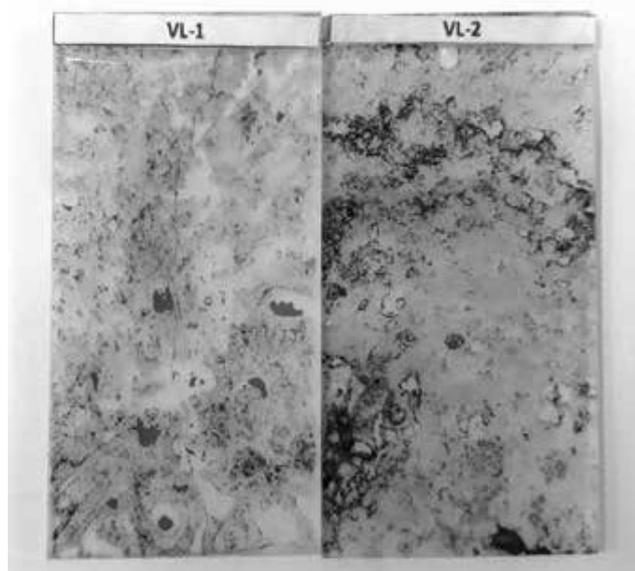
La reacción que se presenta es la siguiente: $\text{CaCO}_3 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$

Mineralogía

El estudio mineralógico se realizó mediante microscopía de luz polarizada; este análisis es de gran importancia ya que permite identificar en sección delgada los minerales constituyentes de la roca, su porosidad, grado y tipos de fisuras; el análisis de estos parámetros permite correlacionarlas con las propiedades mecánicas y sirve como herramienta de diagnóstico, para la prevención de patologías y problemáticas de proyectos en la ingeniería civil.

Para este laboratorio se usó el microscopio de referencia ZEISS AXIO SCOPE. A1, petrográfico de reflexión, refracción y fluorescencia. Para la muestra, se extrajeron dos secciones delgadas denominadas como VL-1 y VL-2, objeto de estudio (Figura 2).

Figura 2: Secciones delgadas para microscopía de luz polarizada.



Fuente: autores

Caracterización Comportamiento Hídrico: Ensayo determinación densidad aparente, porosidad y absorción de agua aparente

El uso de este ensayo tiene como objetivo determinar algunos índices físicos de la roca aplicando la norma NBR12766, a partir del método de los tres pesajes, en estado seco, saturado y saturado inmerso (Figura 3), para la obtención de los siguientes parámetros: masa específica aparente seca, masa específica aparente saturada, porosidad aparente y absorción de agua aparente, los cuales se obtienen por medio de las ecuaciones descritas (Tabla 3).

El término "Aparente" muestra que el volumen promedio en las determinaciones es relativo total del volumen de la muestra en análisis, en otras palabras, volumen de sólidos más volumen de poros. (Becerra J. , 2009)

Este ensayo permite analizar la influencia de estos parámetros en la durabilidad de la roca. Por ejemplo, la porosidad de la roca puede influir en la permeabilidad y absorción de agua, siendo un valor a considerar si se piensa utilizar en revestimientos de fachadas interiores y exteriores, pisos exteriores, etc.

Tabla 3. Ecuaciones ensayo determinación de la densidad aparente, la porosidad y la absorción de agua aparente. (ABTN, 1992)

Densidad Aparente Seca (ρ_{sec})	Densidad Aparente Saturada (ρ_{sat})	Porosidad (η)	Absorción de agua aparente (α)
$\frac{A}{(B - C)} \left(\frac{g}{cm^3}\right)$	$\frac{B}{(B - C)} \left(\frac{g}{cm^3}\right)$	$\frac{(B - A)}{(B - C)} \times 100 (\%)$	$\frac{(B - A)}{A} \times 100 (\%)$

Fuente: (ABTN, 1992)

Donde A representa el peso seco, B representa el peso saturado y C representa el peso hidrostático.

Figura 3. Montaje del ensayo de determinación de densidad aparente, porosidad y absorción de agua aparente.



Fuente: autores

Caracterización del Comportamiento Hídrico: Ensayo absorción de agua por capilaridad

El ensayo de absorción de agua por capilaridad se realiza con base en la norma UNE-EN 1925:1999. Se requieren seis probetas de la roca analizada en estado seco, sometidas al contacto con una columna de agua, de tal manera que se produzca la absorción de agua por

los poros de tipo capilar (Figura 4). La masa es medida en forma discontinua, pesándose las probetas en intervalos de tiempo predeterminados por lo cual se interrumpe mínimamente la absorción durante la pesada. El transporte de agua por capilaridad es un mecanismo de gran importancia para rocas ornamentales, ya que permite analizar el comportamiento de transporte de fluidos dentro de la roca directamente relacionado con el tamaño de poro, con el fin de averiguar la velocidad de absorción, y coeficiente de absorción. La durabilidad de la roca puede ser afectada por la capacidad de absorción de agua, cristalización de sales, contaminación ambiental, migración de fluidos, etc. Con este ensayo se determina el nivel de susceptibilidad al deterioro al cual se encuentra expuesto. (Benavente D. B., 2006).

Figura 4. Ensayo de absorción de agua por capilaridad. A.- Nivel de absorción con rayado color rojo, probetas con diferentes grados de absorción B.- Procedimiento del ensayo absorción de agua por capilaridad.



Fuente: autores

Caracterización del Comportamiento Mecánico: Resistencia a la Compresión

Este método de ensayo se realiza según la norma UNE 22-185 para determinar la resistencia máxima a la compresión en muestras de mármoles y calizas en forma cilíndrica la cuales se someten a saturación en agua filtrada a 20 °C por 48 horas consecutivas. Adicionalmente el ensayo se complementa con la determinación de resistencia para muestras previamente secadas en horno de laboratorio por 48 horas a 70±5°C. Las probetas utilizadas están confeccionadas conforme los requerimientos de la norma, aunque con algunas modificaciones debido a la cantidad limitada del número de probetas, material de cantera y recursos económicos. Las probetas fueron confeccionadas con dimensiones de cinco centímetros de altura y cinco centímetros de diámetro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización macroscópica y reactividad química

El travertino estudiado es una roca sedimentaria de origen químico, de color crema amarillo, compuesta de cristales de calcita, de dureza 3 según la escala de Mohs, con alta reactividad al ácido clorhídrico (HCl), que indica un alto contenido en carbonato de calcio (CaCO₃), mineral fundamental en rocas calizas; como minerales accesorios se identifican óxidos de hierro, de coloración oscura. La roca se caracteriza por su alta porosidad, el desarrollo de cavidades irregulares tanto conectadas como no conectadas y la estructura levemente bandeada, todas estas, características observadas a simple vista (Figura 5)

Figura 5. Medición de la dureza aplicando la escala de Mohs



Fuente: autores

En la prueba de solubilidad en ácido clorhídrico, se obtiene reactividad o efervescencia química superficial, debido a que la roca está compuesta por netamente por el mineral calcita (CaCO_3) (Figura 6).

Figura 6. Identificación de la muestra solubilidad en ácido clorhídrico



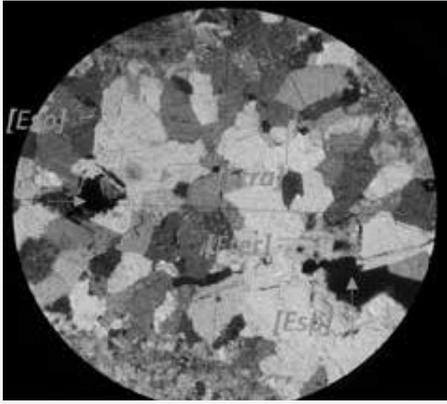
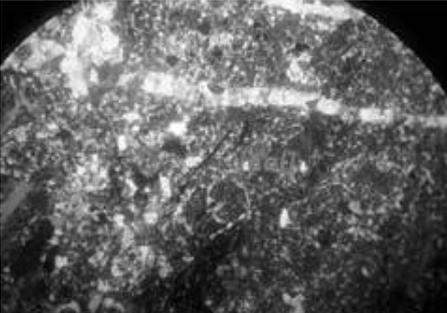
Fuente: autores

La presencia de solubilidad al ácido clorhídrico en relación a la exposición con el medio ambiente, indica que es un material susceptible a las condiciones de alta contaminación atmosférica que puedan llegar a generar lluvias ácidas, como también a sustancias químicas de limpieza si es usado como revestimiento de piscinas, baños, etc.

Mineralogía

Por medio del microscopio de luz polarizada con objetivos de 5x, se aprecia la mineralogía de dos secciones delgadas del travertino, identificadas por las siglas VL-1 y VL-2. Son identificados los elementos constituyentes mediante siglas en color rojo (en ocasiones señaladas por una flecha) y su descripción correspondiente. Los componentes mineralógicos observados en las dos muestras son los mismos. La roca está constituida por calcita, la cual aparece haciendo parte de la matriz de micrita y en menor proporción en forma de calcita cristalina (esparita); su porosidad alta debido al gran contenido micritico de porosidad intercrystalina, en algunos casos se presentan poros de tipo fenestral, fracturas intergranulares e intragranulares, algunas de las cuales se encuentran rellenas de calcita por recristalización. Se encuentran también estilolitos que afectan la roca aumentando la susceptibilidad y deterioro ya que permiten el fácil acceso de sustancias al interior de la roca (Tabla 4).

Tabla 4. Caracterización y descripción mineralógica.

<p>Muestra VL-2:</p> 	<p>Compuesta de <i>Micrita</i> [Mic]; es decir matriz o lodo carbonatico, en una cantidad de $\geq 40\%$, la cual se muestra en forma de cristales finos indefinidos, color marrón. Presenta <i>Cristales de calcita</i> [Cal] de colores de interferencia altos (colores pastel), en $\geq 50\%$ originados como cemento, perfectamente cristalizados. Se observa la macla de la calcita con nícoles cruzados de maclado laminar.</p> <p>Se encuentran Estilolitos [Est] producidos por procesos de disolución de altas temperaturas, haciendo la roca más susceptible al deterioro.</p>
<p>Muestra VL-2:</p> 	<p>Cristales de Calcita de relieve moderado en diferentes grados de cementación o cristalización posterior.</p> <p>Formación de fisuras interconectadas tanto de tipo <i>intragranular</i> [Ftra] como <i>intergranular</i> [Fter], posteriormente influenciadas por calcita esparítica, componente principal de relleno.</p> <p>Porosidad media-alta es apreciada en manchas oscuras y azules rellenas de resina [Esp].</p>
<p>Muestra VL-2:</p> 	<p>Relleno de fisura por Carbonato de Calcio o calcita, [Cal] formada por recristalización, posterior a la formación de la roca, la orientación de sus cristales de calcio es índice de una diferencia en la formación mineral.</p>

Fuente: autores

Densidad aparente, porosidad aparente y absorción de agua aparente

Los resultados de la determinación de densidad aparente seca (kg/m³), densidad aparente saturada (kg/m³), porosidad (%) y absorción de agua (%). Los resultados de este ensayo se muestran en la Tabla 5.



Tabla 5. Calculo de la densidad aparente, porosidad y absorción de agua aparente.

Muestra	W. Seco (g)	W. Saturados (g)	W. Hidrostatática (g)	Densidad aparente seca (kg/m ³)	Densidad aparente saturada (kg/m ³)	Porosidad (%)	Absorción de agua (%)
P-1	201,11	209,78	126,54	2,42	2,52	10,42	4,31
P-2	221,41	226,52	138,29	2,51	2,57	5,79	2,31
P-3	224,94	231,91	141,23	2,48	2,56	7,69	3,1
P-4	213,69	223,87	140,2	2,55	2,68	12,17	4,76
P-5	231,45	236,71	148,89	2,64	2,7	5,99	2,27
P-6	209,9	220,29	135,43	2,47	2,6	12,24	4,95
			Media	2,51	2,61	9,05	3,62

Fuente: autores

La variabilidad de las características de densidad, porosidad y absorción de agua del travertino como roca ornamental, se hace evidente al comparar resultados de otras investigaciones, como los del "travertino-II" de Teherán (República Islámica de Irán) (Amin Jamshidi, 2013), cuyos valores de los parámetros son diferentes a los observados en el travertino Villa de Leyva (Tabla 6).

Tabla 6. Comparación de resultados de la densidad aparente, porosidad y absorción de agua aparente.

Localización	Densidad aparente seca (g/cm ³)	Densidad aparente saturada (g/cm ³)	Porosidad (%)	Absorción de agua (%)
Villa de Leyva	2,51	2,61	9,05	3,62
Teherán	2,41	2,44	2,93	1,22

Fuente: autores

Los resultados obtenidos son similares en densidad aparente seca y saturada para las dos rocas, pero el porcentaje de porosidad y absorción de agua es mucho mayor para el travertino de Villa de Leyva. Se observa una mayor capacidad de absorción de agua dentro de la roca, al caracterizarse por tener un porcentaje de porosidad abierta o conectada mayor, la cual permite el fácil acceso de diferentes sustancias haciéndolo más susceptible a la degradación en ambientes externos, húmedos, ambientalmente contaminados, etc.

Algunas propiedades de la roca son valoradas según las especificaciones técnicas de la Normas ABNT-NBR 12766 y ASTM C503 para revestimientos horizontales. En la Tabla 7 se aprecian los valores requeridos (Especificaciones técnicas) y la valoración del cumplimiento para la roca de estudio (travertino de Villa de Leyva).

Tabla 7. Parámetros técnicos sugeridos en especificaciones de rocas ornamentales de revestimiento

Propiedades Valoración	Densidad aparente seca (g/ cm ³)	Porosidad (%)	Absorción de agua aparente (%)
Especificaciones técnicas *	≥ 2,7	No aplica	< 0,75
Cumplimiento travertino de Villa de Leyva	No cumple	No aplica	No cumple

Fuente: Autores

* *Tecnología de Rochas na Construção Civil* (Frazão, 2002)

Ensayo de absorción por capilaridad

En la Tabla 8, se encuentran los resultados del ensayo de absorción de agua por capilaridad realizado según la norma UNE-EN 1925, para la medición e interpretación del comportamiento hídrico y determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad. Se observan los resultados de cada una de las probetas en unidades de (g/m²·s^{0,5}) y el promedio general del travertino evaluado.

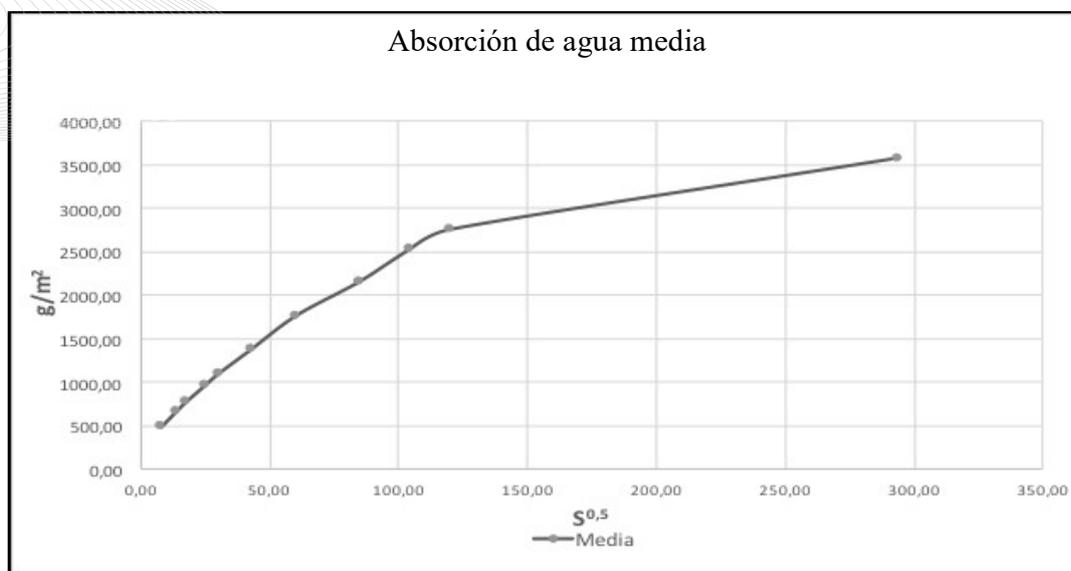
La Figura 7 muestra la cantidad de masa en agua absorbida por capilaridad (g/m²), representada con relación a la variable Tiempo en unidades de s^{1/2}, en la cual se observa la rápida absorción por capilaridad en la primera etapa o primeros minutos de ensayo y luego la disminución en la ganancia de masa con relación al tiempo, lo cual muestra la saturación interna de los poros.

Tabla 8. Coeficiente absorción de agua por capilaridad.

Probeta Nº	1	2	3	4	5	6	Media
Coeficiente absorción de agua por capilaridad (g/ m ² ·s ^{0,5})	23,33	13,03	23,95	32,54	21,58	30,44	24,14

Fuente: autores

Figura 7. Absorción de agua por capilaridad perpendicular a los planos de anisotropía en función de la raíz cuadrada del tiempo ($c_{med}=24,14 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$).



Fuente: autores

Los resultados encontrados de absorción de agua por capilaridad están relacionados con el porcentaje de porosidad, la presencia de pequeños poros de tipo capilar y su conectividad. Se puede ver el mismo comportamiento en la roca denominada "Travertino Rojo de Mula" la cual obtuvo un coeficiente de absorción capilar de $19,48 \pm 6,06 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^0$ para facies bandeadas paralelas contando una porosidad de $10,01 \pm 1,40\%$ (Ma. Ángeles García, 2014)

Esto indica que los poros de menor tamaño son principalmente activos al transporte de agua por capilaridad (poros de tamaño entre $0,1-1.000 \mu\text{m}$) (Benavente D., 2006). Por el contrario, los poros interpartícula de mayor tamaño, un mayor volumen o capacidad de poros (mayores a 1mm), ejercen una menor generación de absorción de acceso capilar ascendente (Ioannou, 2009).

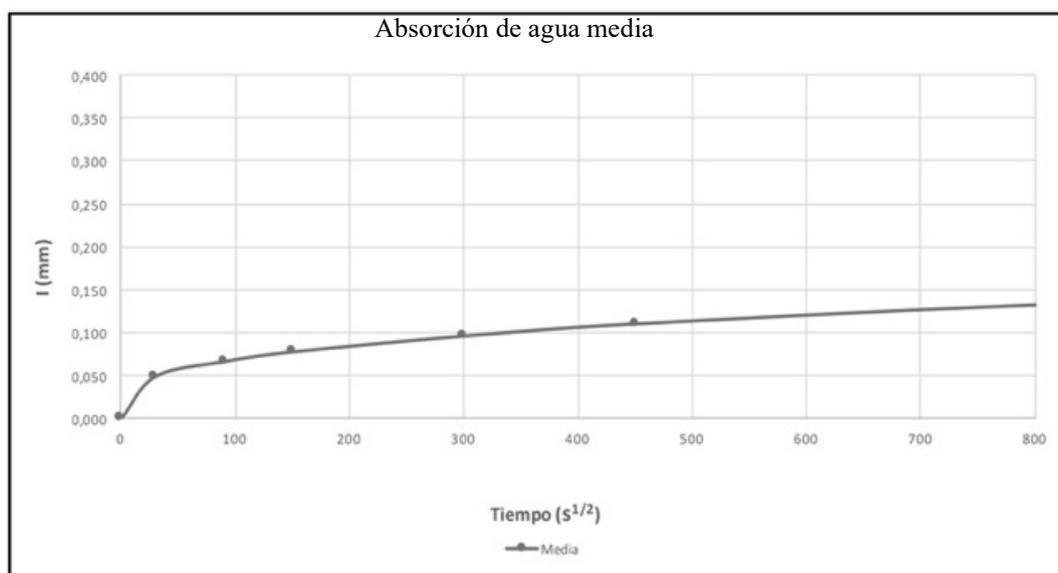
Los resultados obtenidos en velocidad de absorción (Tabla 9) y el comportamiento gráfico (Figura 8) se expresan mediante valores de velocidad de absorción media del material. La importancia de este parámetro radica en que se puede determinar el nivel de susceptibilidad al deterioro del travertino, es decir, a mayor velocidad de absorción de agua capilar la roca tendrá mayor susceptibilidad al deterioro.

Tabla 9. Velocidad de absorción por capilaridad

$S^{1/2}$ (S)	30	90	150	300	450	900	1800	3600	5400	7200	43200	Promedio
Velocidad de absorción capilar media ($i/S^{1/2}$)	0,049	0,067	0,078	0,096	0,111	0,138	0,177	0,216	0,253	0,276	0,358	0,165

Fuente: autores

Figura 8. Gráfica velocidad de absorción de agua por capilaridad



Fuente: Autores

Resistencia a la Compresión

Los resultados de la medición del esfuerzo máximo resistente (kN) para cada una de las seis muestras en estado seco y saturado se encuentran a continuación en las Tablas 10 y 11, donde la resistencia es enunciada en MPa, de forma individual y promedio para cada estado.

Tabla 10. Resistencia a la compresión de cilindros para condición Saturada.

Resistencia a la compresión de cilindros para condición saturada							
Nº Muestra	1	2	3	4	5	6	Promedio
C. max (kgf)	3439	3519	2180	2372	5427	2227	3194
(Kgf/cm ²)	175	179	111	121	276	113	162
R (MPa)	17	18	11	12	27	11	16

Fuente: autores

Tabla 11. Resistencia a la compresión de cilindros para condición seca.

Resistencia a la compresión de cilindros para condición seca							
Nº Muestra	1	2	3	4	5	6	Promedio
C. max (kgf)	5989	5244	3641	6212	5312	3968	5061
(Kgf/cm ²)	305	267	185	316	270	202	258
R (MPa)	30	26	18	31	26	20	25

Fuente: autores

Los bajos valores a la resistencia a compresión en condición saturada, indican poca viabilidad de uso de tipo estructural (Ej: columnas o muros). El material en uso de tipo estructural, puede presentar fallas por corte de manera súbita, debido a las características mecánicas de la roca. Esta roca para uso de tipo ornamental está clasificada según la norma NBR 12767 o ASTM 170 como de baja resistencia a la compresión, debido a que la norma exige un valor mínimo de resistencia >52 MPa.

CONCLUSIONES

- La roca está constituida por calcita, en forma de micrita como parte de la matriz de la roca y por esparita como material cementante y relleno de fisuras. La alta porosidad del travertino, con poros de tipo fenestral, fracturas intergranulares e intragranulares, además de estilolitos de disolución facilitan el fácil acceso de sustancias al interior de la roca aumentando la susceptibilidad al deterioro.
- Los resultados de los ensayos de solubilidad al ácido clorhídrico, porosidad, absorción de agua, velocidad de absorción y absorción capilar de agua indican que el travertino de Villa de Leyva presenta alta susceptibilidad ante procesos de deterioro en ambientes de alta contaminación ambiental, ambientes húmedos, ambientes oceánicos y ante la exposición a sustancias químicas.
- Los resultados del ensayo de resistencia a la compresión, demuestran la baja factibilidad del material para usos de tipo estructural (Ej. Columnas y muros) elementos influenciados por cargas, por lo cual no se recomienda el uso en estos elementos. Para elementos de tipo arquitectónico el material presenta buena viabilidad para revestimientos internos, lugares apartados a la contaminación ambiental, sustancias químicas y a la humedad.
- Los ensayos de comportamiento hídrico y mecánico permiten prever futuras patologías y daños estructurales en rocas usadas como revestimiento de fachada y acabados expuestos a la intemperie. La gran importancia que tiene la implementación de estos ensayos radica en que pueden ser aplicados para otros materiales requeridos para obras civiles, como por ejemplo en concretos.
- La caracterización de materiales es necesaria para la extracción, comercialización y utilización de materiales pétreos en las obras civiles ya que cumple con el objetivo de determinar si el material es factible o no de acuerdo a los requerimientos estimados de obra.
- Es recomendable hacer uso de equipos especializados en la realización de los ensayos de laboratorio, de esta forma la investigación puede llegar a ofrecer resultados de mayor precisión.
- Dentro del perfil del ingeniero civil debe primar la ética, desde la selección de los materiales a utilizar en las obras de ingeniería, siempre realizando una buena investigación de las propiedades presentes en los materiales antes de construir, para evitar pérdidas económicas o pérdidas de vidas por el desarrollo de patologías resultantes de su incorrecta implementación.

REFERENCIAS

- ABTN, A. B. (1992). Rochas para revestimento. Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente. Norma NBR 12766.
- American Psychological Association. (2010). Manual de Publicaciones de la American Psychological Association (6 ed.). (M. G. Frías, Trad.) México, México: El Manual Moderno.
- Amin Jamshidi, M. R. (2013). Predicting the long-term durability of building stones against freeze-thaw using a decay function model. *Cold Regions Science and Technology*, 29-36.
- Angulo, F. (2009). Tipologías Arquitectónicas Coloniales y Republicanas. En F. Angulo, *Tipologías Arquitectónicas Coloniales y Republicanas, Afinidades y Oposiciones* (pág. 9). Cartagena de indias: Jorge Tadeo Lozano.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1992). Rochas para revestimento - Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente. Rio de Janeiro: Norma NBR 12766.
- ASTM D2434-68. (2000). Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000,
- ASTM D5731-16. (2016). Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Becerra, J. (2007). Ensaio de alteração acelerada para avaliação da durabilidade de seis granitos ornamentais brasileiros. *Revista Geonomos*, Volume 15, Número 2. Instituto de Geociencias. Universidade Federal de Minas Gerais – Brasil. ISSN (eletrônico):2446-6964. ISSN (impresso):0104-4486.
- Becerra, J. &. (2008). Especificaciones de uso de rocas ornamentales con base en ensayo de alteración acelerada. *Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo*, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - UPTC. Volumen 6, 30-38.
- Becerra, J. (2009). "Avaliação das susceptibilidades aos processos de deterioração dos Calcários ornamentais da formação La Tampa usados na construção civil de Medellín-Colombia" Tesis de Doctorado. IGC/UFMG.
- Becerra, J. (2013). Proyecto de Investigación: la extracción minera de areniscas de la formación une. Incidencia en la estabilidad de taludes. Caracterización físico-química, mecánica y de alterabilidad para optimización de extracción y uso en obras viales y en arquitectura.
- Benavente, D. (2006). Utilización de rocas y minerales industriales (M.A. García-del-Cura y J.C. Cañaveras, Eds.). *Seminarios de la Sociedad Españolas de Mineralogía*, 123-153.
- Benavente, D. (2009). Influencia de la petrografía en las propiedades petrofísicas y de durabilidad del Travertino Clásico. *Valoración de su anisotropía*. *GEOGACETA*, 147-150.
- Benavente, D. B. (2006). Propiedades físicas y utilización de rocas ornamentales. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 62-68.
- Chris L. Hayward, D. V. (1999). Roman Marble Quarries in Southern Euboea and the Associated Road Systems.
- Dapena, E. (1996). Características mecánicas de materiales de construcción. *Degradación y conservación del Patrimonio Arquitectónico* (F. Mingarro. Ed.), 249-269.
- El Tiempo. (2003). Mármoles y Granitos en la Globalización. [online] Available at: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-996790> [Accessed 4 Aug. 2018].
- Frazão, E. B. (2002). Tecnologia de rochas na construção civil. *Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*.
- Giancarlo Renzoni, H. R. (1998). Mapa geológico, Plancha 191 Tunja (1:100000). INGEOMINAS.
- Griem, W. (2 de 02 de 2017). Geología general. Obtenido de GeoVirtual2 y Museo Virtual: <http://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/ggcap02a.htm>
- Hernández-Gutiérrez, L. S.-B.-G. (2013). Prácticas de Ingeniería del Terreno. Universidades de Alicante y de La Laguna. Obtenido de <http://web.ua.es/es/ginter/> ó <http://ocw.ull.es/>: License: Creative Commons BY-NC-SA
- Hernández-Gutiérrez, L. S.-B.-M. (2013). Prácticas de Ingeniería del Terreno. Universidades de Alicante y de La Laguna. Obtenido de <http://web.ua.es/es/ginter/> ó <http://ocw.ull.es/>: License: Creative Commons BY-NC-SA.
- Ioannou, I. A. (2009). *Engineering Geology*, 109, 20-23.
- J. J. Howland, A. R. (2013). Estudio de la absorción capilar y la sorptividad de hormigones con áridos calizos cubanos. *Materiales de Construcción*, 515-527.

K. Miroslav, H. R. (2005). Evaluación hidrogeológica de pozos a través de registros geofísicos. *Fundamentos*. Unam, 88.

Leyva, A. M. (2004). Plan de Desarrollo Municipal 2004 – 2007. Villa de Leyva.

M. A. García Del Cura, A. L. (2007). Mineralogía De Los Travertinos Pleistocenos De Albox (Almería), Importante Recurso De Materia Prima De Rocas Ornamentales. *Macla 7 Xxvii Reunión De La Sociedad Española De Mineralogía*, 89.

M. Urosevic, E. S.-A. (2011). Evaluación de las propiedades físicas de dos rocas carbonáticas usadas como material de construcción actual e histórico en Andalucía Oriental, España. *Mater. Cons.* 61, 93-114.

Ma. Ángeles García, D. B. (2014). Los travertinos de Baños de Mula (Murcia). Una roca de interés sedimentológico y arqueológico. *Geogaceta*, 56-60.

Macla • 7 • XXVII Reunión De La Sociedad Española De Mineralogía – 2007 Mineralogía De Los Travertinos Pleistocenos De Albox (Almería), I. R.-U.-U. (s.f.).

N.Q.A.M.Yusofa, H. (2016). Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of granitic rock from Hulu Langat, Selangor. *Procedia Chemistry*, Volume 19, 975-980.

P.G.Q. Amaral, T. G. (2011). Uranium distribution and radon exhalation from Brazilian dimension stones. 5.

Patarroyo, P. &-M. (1997). Nuevas consideraciones en torno al Cabeceo del Anticlinal de Arcabuco, en cercanías de Villa de Leyva – Boyacá. *Rev. Geología Colombiana*, p.27-34.
Pentecost, A. (2005). *Travertine*. Springer, 445.

Rodríguez, A. J. (2002). Mapa de Minerales Industriales Zonas Potenciales para Materiales de Construcción. INGEOMINAS Memoria Técnica, , RS3_02 .

Rodríguez, E. (13 de 03 de 2018). Comunicación personal. (G. Buitrago, Entrevistador)

UNE 22-185-85. (1985). Mármoles y calizas ornamentales resistencia a la compresión. Madrid: IRANOR.

UNE EN 101. (s.f.). Determinación de dureza al rayado de la superficie según escala de Mohs. Madrid: AENOR.

Valencia, B. G. (2009). Contribución en la determinación de los posibles paleoambientes de las rocas Cretáceas Tempranas sobre la vía Tunja-Villa de Leyva (entre Alto del Arrayán - Peaje Sáchica) y sectores aledaños, departamento de Boyacá. *Universidad de Caldas. Universidad de Caldas.*, 1–127.