

**ESTUDIO PRELIMINAR DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS,
MINERALÓGICAS Y QUÍMICAS DEL TRAVERTINO DE MÁLAGA, SANTANDER
EMPLEADO EN LA RENOVACIÓN DE LA PLAZA DE BOLÍVAR, TUNJA.**



JHEYSON ANTONIO SUÁREZ REATIGA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

TUNJA BOYACÁ

2022

**ESTUDIO PRELIMINAR DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS,
MINERALÓGICAS Y QUÍMICAS DEL TRAVERTINO DE MÁLAGA, SANTANDER
EMPLEADO EN LA RENOVACIÓN DE LA PLAZA DE BOLÍVAR, TUNJA.**

JHEYSON ANTONIO SUÁREZ REATIGA

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil

Director

JAVIER EDUARDO BECERRA BECERRA

Geólogo. Doctor (PhD) en Geología Económica y Aplicada

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

TUNJA BOYACÁ

2022

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer especialmente a mis padres Miriam Reátiga y Antonio Suárez por su apoyo incondicional y a mi hermano Edwin Suárez por su ayuda y motivación.

A mi tutor PhD Javier Eduardo Becerra Becerra, quien con su paciencia y conocimiento me oriento durante el desarrollo de mi trabajo de grado. Dedico su tiempo, experiencia y conocimiento al desarrollo de esta investigación.

Al ingeniero Aldemar Sandoval, quien siempre estuvo dispuesto a colaborar y me abrió las puertas de la cantera La Primavera, lugar de extracción del Travertino de Málaga.

A Fredy Hernández, laboratorista de la universidad conocido por su amabilidad, agradecerle por su colaboración y apoyo técnico durante los ensayos de laboratorios realizados en la universidad.

Al ingeniero Manuel Salgado, por su colaboración en laboratorio, su ayuda y experiencia fueron indispensables.

Por último, agradecer a La Universidad Santo Tomás Tunja, por brindarme el conocimiento necesario para hacer frente al presente proyecto investigativo y por abrir espacios físicos y virtuales como: el laboratorio de geotecnia, biblioteca, acceso a las diferentes bases de datos y repositorio institucional.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Javier Eduardo Becerra Becerra. Director_____

JURADO 1

JURADO 2

Índice de Contenido

1	<i>Introducción</i>	13
2	<i>Problema de Investigación.....</i>	14
2.1	<i>Descripción De La Problemática.....</i>	14
2.2	<i>Preguntas De Investigación</i>	14
2.3	<i>Justificación</i>	15
2.4	<i>Objetivos.....</i>	17
2.4.1	<i>Objetivo general.....</i>	17
2.4.2	<i>Objetivos específicos</i>	17
3	<i>Estado del arte</i>	18
3.1	<i>Antecedentes.....</i>	18
3.1.1	<i>Antecedentes internacionales.....</i>	18
3.1.2	<i>Antecedentes Nacionales.....</i>	18
3.1.3	<i>Características físicas químicas y texturales, factores de riesgo para el travertino</i>	21
3.1.4	<i>La Piedra Natural Como Pavimento Peatonal</i>	27
3.1.5	<i>Resistencia a la flexión.....</i>	29
3.1.6	<i>Valor esperado de resistencia a flexión para piedra natural</i>	31
3.1.7	<i>Diseño y predimensionado del pavimento peatonal en piedra natural según norma UNE-EN 1341 anexo A.....</i>	32

3.1.8	<i>Caracterización tecnológica del Travertino de Málaga</i>	35
4	<i>Materiales y Métodos</i>	37
4.1	<i>Trabajo de Campo.....</i>	37
4.1.1	<i>Localización</i>	37
4.2	<i>Marco Geológico.....</i>	41
4.2.1	<i>Geología del sector</i>	41
4.2.2	<i>Clima</i>	42
4.2.3	<i>Generalidades cantera La Primavera.....</i>	43
4.2.4	<i>Uso del travertino de Málaga en la región aledaña</i>	47
5	<i>Trabajo de Laboratorio.....</i>	51
5.1.1	<i>Preparación de las probetas</i>	51
5.1.2	<i>Caracterización Física Y Propiedades Básicas De Circulación De Fluidos</i>	52
5.1.3	<i>Propiedades básicas de circulación de fluidos.....</i>	58
5.1.4	<i>Caracterización mecánica.....</i>	60
5.1.5	<i>Propiedades mineralógicas, químicas y texturales.....</i>	61
6	<i>Resultados y Análisis.....</i>	62
6.1	<i>Resultado y Análisis Densidad Aparente, Porosidad Abierta.....</i>	62
6.2	<i>Resultados y análisis de absorción por capilaridad</i>	65
6.3	<i>Resultados y Análisis de Resistencia a la Flexión</i>	68
6.3.1	<i>Relación de características mecánicas con criterio de espesor.</i>	68

6.4	<i>Resultados Análisis Químico y Mineralógico</i>	72
7	<i>Conclusiones</i>	75
7.1	<i>Recomendaciones</i>	77
8	<i>Glosario.....</i>	78
9	<i>Referencias Bibliográficas</i>	81
10	<i>Apéndices y Anexos</i>	86

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Subestructura pavimento peatonal.</i>	27
<i>Figura 2. Ubicación puntos: T-1, T-2, T3 y T-4.</i>	39
<i>Figura 3. Ubicación cantera la primavera. Geología correspondiente a la plancha 136 del IGAC.....</i>	40
<i>Figura 4. Geología de la cantera La primavera ubicada en la plancha 136 del IGAC.....</i>	41
<i>Figura 5. Climograma municipio de Málaga</i>	43
<i>Figura 6. Cantera la primavera.....</i>	44
<i>Figura 7. Método de banqueo, en cantera La Primavera.</i>	45
<i>Figura 8. Corte con hilo helicoidal.</i>	46
<i>Figura 9. Planta de corte y acabado.</i>	47
<i>Figura 10. Uso del Travertino, Catedral Inmaculada Concepción y placa conmemorativa. Málaga.</i>	48

<i>Figura 11. Fachada de Unad en Travertino de Málaga.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 12. Parque Principal, Adolfo Roa Rodríguez, San José de Miranda</i>	<i>50</i>
<i>Figura 13. Identificación y Numerado de las Probetas a estudiar.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 14. Materiales y equipos de laboratorio.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 15. Determinar msec para muestra TM1.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 16. Determinar msat para muestra TM1.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 17. Montaje realizado para determinar mim.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 18. Montaje para Ensayo de Laboratorio: Determinación absorción por capilaridad... 60</i>	
<i>Figura 19. Módulo de Ruptura (MR).....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 20. Absorción por capilaridad.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 21. Resultados fluorescencia de rayos X (FRX)</i>	<i>73</i>
<i>Figura 22. Difractograma obtenido, muestra TVM.....</i>	<i>74</i>

Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Especificaciones para el módulo de rotura ASTM C99 (equivalente a la resistencia a la flexión bajo carga concentrada) en las normas ASTM.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 2. Valores de carga de rotura mínima F establecidos para diferentes usos típicos en pavimentos de exterior (UNE-EN 1341 Anexo A).....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 3. Valores del factor de seguridad S para diferentes sistemas de colocación de pavimentos (UNE-EN 1341 Anexo A y UNE 22202-1).....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 4. Métodos De Ensayo De Caracterización Tecnológica En Rocas Ornamentales.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 5. Coordenadas Geográficas y Planas del Sitio De Estudio</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 6. Coordenadas Geográficas y Planas del Sitio De Estudio</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 7. Especificaciones para la densidad aparente en las normas ASTM.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 8. Densidad Aparente, Porosidad Abierta y Coeficiente de Absorción De Agua, Por Muestra, Travertino de Málaga. UNE-EN 1936:2007.</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 9. Densidad Aparente, Porosidad Abierta Y Coeficiente De Absorción De Agua, Resultado Final, Travertino de Málaga. UNE-EN 1936:2007.</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 10. Coeficiente De Absorción De Agua por capilaridad, Resultado Final, Travertino de Málaga. UNE-EN 1925:1999.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 11. Módulo de rotura ASTM C99 (equivalente a la resistencia a la flexión bajo carga concentrada) en las normas ASTM.....</i>	<i>69</i>

Resumen

Esta investigación surge a raíz del uso del travertino de Málaga como superficie de circulación peatonal en la plaza de Bolívar de la ciudad de Tunja (Boyacá). El travertino es una roca carbonatada sedimentaria de origen continental que ha sido usada desde hace más de 2.000 años. Este trabajo de grado busca establecer de manera preliminar las propiedades físico-mecánicas, mineralógicas y químicas del travertino de Málaga (Santander), empleado como material ornamental de recubrimiento exterior en la Plaza de Bolívar de Tunja; luego de su instalación, en baldosas de 30mm de espesor, se ha observado el desarrollo de fisuras y ruptura total de algunas. El trabajo experimental se desarrolla en dos fases principales: en la primera, se realiza la correspondiente visita de campo a la cantera de explotación del material. En la segunda fase, de laboratorio, en la que se realiza caracterización físicomecánica, química y se establecen algunas propiedades de circulación de fluidos. Luego de realizar ensayo de módulo de rotura (ASTM C99), se encontró que el valor mínimo esperado corresponde a 8,96 MPa, y al realizar el adecuado predimensionado de las losas de travertino según norma UNE-EN 1341 Anexo A, se encuentra que las losas de travertino utilizadas en la plaza de Bolívar de Tunja fallan por capacidad mecánica insuficiente, ya que se debió usar un espesor mínimo de 45mm.

De la caracterización química por FRX, se encontró que el travertino de Málaga está conformado por un 98% de calcio; los resultados de DRX indican que mineralógicamente está constituido por 91,5 % de carbonato de calcio en forma de “Calcita”, con trazas de óxido de silicio, oxihidroxido de aluminio y carbonato de hierro. Su coeficiente de absorción por capilaridad es en promedio $2399.54 \text{ g/m}^2 \times \text{s}^{0.5}$; su porosidad varía del 5.7% al 8.3% y su densidad promedio es de 2737 kg/m^3 . De acuerdo con los resultados, el travertino de Málaga tiene una densidad superior a la densidad promedio publicados por ASTM C1527 (2305 kg/m^3). los resultados de capilaridad y

porosidad reflejan la gran anisotropía del material, así como la variabilidad de su porosidad en la estructura de la roca.

Palabras clave: travertino, caracterización, pavimento, losa, roca, susceptibilidad, deterioro.

Abstract

This research arises from the use of Malaga travertino a pedestrian circulation surface in the Bolivar square of the city of Tunja (Boyacá). Travertino is a sedimentary carbonate rock of continental origin that has been used for more than 2,000 years. This degree work seeks to establish in a preliminary way the physical-mechanical, mineralogical and chemical properties of travertino from Málaga (Santander), used as an ornamental material for exterior covering in the Plaza de Bolívar of Tunja; after its installation, in 30mm thick tiles, the development of cracks and total rupture of some of them has been observed. The experimental work is developed in two main phases: in the first one, the corresponding field visit to the quarry where the material is exploited is carried out. In the second phase, in the laboratory, physical-mechanical and chemical characterization is carried out and some properties of fluid circulation are established. After testing the modulus of rupture (ASTM C99), it was found that the minimum expected value corresponds to 8.96 MPa, and after performing the proper pre-dimensioning of the travertine slabs according to standard UNE-EN 1341 Annex A, it was found that the travertino slabs used in the Bolivar Square in Tunja failed due to insufficient mechanical capacity, since a minimum thickness of 45 mm should have been used.

From the chemical characterization by XRF, it was found that the travertino of Malaga is composed of 98% calcium; the XRD results indicate that mineralogically it is composed of 91.5%

calcium carbonate in the form of "Calcite", with traces of silicon oxide, aluminum oxyhydroxide and iron carbonate. Its capillary absorption coefficient averages $2399.54 \text{ g/m}^2\text{s}^{0.5}$; its porosity varies from 5.7% to 8.3% and its average density is 2737 kg/m^3 . According to the results, the Malaga travertino has a density higher than the average density published by ASTM C1527 (2305 kg/m^3). The results of capillarity and porosity reflect the great anisotropy of the material, as well as the variability of its porosity in the rock structure.

Keywords: Travertine, characterization, pavement, slab, rock, susceptibility, deterioration.

1 Introducción

El travertino (toba calcárea) es una roca sedimentaria química cuyo nombre proviene del latín lapis triburtinos, denominado también Piedra de Tívoli (Ciudad cerca de Roma), Se forma por la precipitación química de calcita y/o aragonito alrededor de centros de surgencia de agua subterránea o en sistemas fluviales ricos en calcio (Pentecost, 2005). Las características del travertino pueden variar ampliamente dependiendo del ambiente de formación, condiciones físico químicas del agua en depósito y actividad biológica. Este material ha sido explotado y empleado en el área de la construcción desde hace más de dos mil años aproximadamente, además, el estudio del travertino es de interés para el área de la geomorfología y ecología, ya que representan un registro paleoclimatológico importante, (Viles y Pentecost, 2007). No obstante, son pocas las investigaciones que han abordado el estudio de estos depósitos en la Cordillera de los Andes (e.g. Valero-Garcés et al., 2001; Gibert et al. 2009; Anselmo, 2017; Quade, 2017).

Durante el desarrollo de este trabajo de grado, se pretende determinar de manera preliminar la factibilidad del uso de este material como superficie de circulación peatonal, por lo que se procede con el desarrollo del mismo en dos fases principales. En la primera fase se realiza la correspondiente visita de campo a la cantera de explotación del material, se realiza toma de muestras, registro fotográfico y geolocalización entre otros procedimientos. Luego de lo cual se procede con la segunda fase que corresponde al trabajo en laboratorio, en donde se llevan a cabo diferentes ensayos de laboratorio a las muestras tomadas con anterioridad, esto con el objetivo de conocer a cabalidad las propiedades mineralógicas, químicas y texturales del travertino de Málaga, adicionalmente se determinan las características físico-mecánicas y las propiedades básicas de circulación de fluidos del travertino de Málaga (Santander), características que condicionan el comportamiento del material ante distintos factores ambientales (Rocha-Vargas et al., 2019).

Posteriormente se procede con el estudio y ponderación de los datos obtenidos de laboratorio, presentación de resultados y análisis de la relación existente entre las propiedades mecánicas, físicas y químicas con respecto a la durabilidad y susceptibilidad del deterioro del travertino de Málaga, Santander.

Esta investigación innova al ser la primera realizada al mármol travertino de Málaga (Santander), durante la caracterización de este material se encuentra una gran anisotropía en el Travertino de Málaga, la porosidad es bastante variable y con ella la densidad del material, cabe resaltar que es un material muy compacto teniendo en cuenta valores de densidad promedio publicados por ASTM C1527 la densidad aceptable de un travertino sería de 2305 kg/m^3 , el travertino de Málaga promedia una densidad de 2737 kg/m^3 .

2 Problema de Investigación

2.1 Descripción De La Problemática

El mármol travertino ha sido usado como roca estructural y como recubrimiento de fachadas desde la antigüedad. Debido a su uso en la plaza de Bolívar en la ciudad de Tunja, se han evidenciado diversas problemáticas como lo son: la acelerada fisuración, desgaste y meteorización química de las losas de travertino colocadas como superficie de circulación peatonal. Dada la belleza de este material, resulta imperativo conocer las características y condiciones para su uso en posteriores proyectos.

2.2 Pregunta De Investigación

- ¿Cuáles son las propiedades físico-mecánicas, mineralógicas y químicas del travertino de Málaga (Santander), que define la susceptibilidad a procesos de deterioro al ser utilizado como superficie de circulación peatonal en la Plaza de Bolívar de Tunja?

2.3 Justificación

El material a investigar fue empleado en la ornamentación de la Plaza de Bolívar de Tunja como proyecto de infraestructura del Plan Bicentenario de la ciudad. Se usó como material para el revestimiento de la Plaza de Bolívar, así mismo es importante resaltar que en la zona se presenta un alto índice de circulación peatonal que podría influir directamente en la durabilidad y conservación de las propiedades mecánicas del travertino. Sin embargo, no existe mayor información acerca de las características físico-mecánicas, mineralógicas y químicas del travertino de Málaga y cómo éstas definen su uso como material de revestimiento para uso peatonal, por esta razón es conveniente llevar a cabo una caracterización del travertino de Málaga, abarcando propiedades que permitan comprobar su aptitud para su uso en elementos estructurales y arquitectónicos en obras civiles, teniendo en cuenta el ambiente urbano y las elevadas solicitaciones derivadas del alto tráfico peatonal en la zona de su implementación, además del potencial de susceptibilidad al deterioro que presenta el material.

Este estudio representa un aporte novedoso en el área de los materiales empleados en obras tanto arquitectónicas como civiles, ya que sería el primer estudio que presenta datos acerca de la caracterización físico-mecánica, mineralógica y química del travertino de Málaga Santander, además de ser uno de los primeros a nivel nacional en cuanto a la caracterización de materiales ornamentales, usados como pavimento peatonal.

Esta investigación sirve como fuente de información para las personas y/o entidades que estén interesadas en llevar a cabo proyectos en los que se involucre el uso del travertino para estructuras de circulación de peatones y usos arquitectónicos, ya que se puede evidenciar de manera preliminar la funcionalidad de este material. Así mismo es útil para futuros investigadores que deseen llevar a cabo una caracterización más completa acerca de este tipo de roca caliza, por

consiguiente, los beneficios de la presente investigación se observan tanto en el área de la investigación como en el área de la ingeniería civil, siendo esta última de gran relevancia, ya que es importante conocer qué material se empleará y cuál será el comportamiento que definirá finalmente su funcionalidad y calidad con respecto al uso que se le está dando. Adicionalmente, esta investigación aporta al lector información acerca de los usos de la piedra natural en Colombia, además de poner en conocimiento normatividad internacional necesaria para lograr proyectos duraderos y que aporten valor agregado en nuestra comunidad utilizando materiales pétreos de producción nacional.

Como se puede observar en el ámbito nacional e internacional, el uso de materiales pétreos ornamentales en elementos urbanos es tendencia en la arquitectura e ingeniería moderna, así como el uso de materiales antes utilizados con otros fines ahora considerados nuevos materiales ornamentales. Dada la creciente importancia de éste y otros materiales, es imperativo que la Universidad Santo Tomás esté a la vanguardia en la investigación y caracterización de este tipo de materiales cuyo uso en ingeniería y arquitectura urbana está vigente y en auge, por ende, este proyecto de investigación y futuros proyectos de la línea Estructuras, Construcción y Nuevos Materiales que estuviesen enfocados a esta temática, serían considerados pioneros en este tema en tendencia, además de que mucho del conocimiento generado al realizar éste proyecto es aplicable a otros materiales pétreos como lo son las diferentes calizas y mármoles usados como materiales de recubrimiento ornamental y diferentes tipos de concreto (roca artificial), lo que situaría a la universidad Santo Tomás en la vanguardia en lo que se refiere a esta línea de investigación.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo General

Establecer de manera preliminar las propiedades físico-mecánicas, mineralógicas y químicas, del travertino de Málaga (Santander), empleado como material ornamental de circulación peatonal en la Plaza de Bolívar de Tunja e identificar características como: porosidad, densidad y factores determinantes en la susceptibilidad de deterioro del mismo.

2.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades mineralógicas, químicas y texturales del travertino de Málaga, para examinar la incidencia de las mismas en el comportamiento mecánico del material con relación a su uso como pavimento peatonal.
- Identificar las características físico-mecánicas y las propiedades básicas de circulación de fluidos del travertino de Málaga, para definir de manera preliminar las características que viabilizan el uso de este material como pavimento peatonal, a la vez que condicionan el comportamiento del mismo ante distintos factores mecánicos y ambientales como lo son la carga peatonal y la contaminación urbana.
- Detectar la relación existente entre las propiedades mecánicas, físicas y químicas con respecto a la durabilidad y susceptibilidad al deterioro del travertino de Málaga, mediante la realización de los ensayos de laboratorio propuestos.

3 Estado del Arte

3.1 Antecedentes

3.1.1 *Antecedentes Internacionales*

Utilización de rocas como pavimentos. Se ha detallado cómo las propiedades de una determinada roca condicionan su uso y comportamiento como materiales de construcción, tanto en obra nueva como en un proyecto de restauración. Además del estudio de las características intrínsecas de una roca, es de interés la realización de ensayos para evaluar su comportamiento una vez puesta en obra, teniendo en cuenta las distintas condiciones que van a afectar al material, tensiones, contacto con disoluciones, variaciones climáticas, etc. (Bernabeu, 2005).

Freire-Lista, J.E. Becerra Becerra, Mila Simões de Abreu (2021). Presentan un caso práctico de economía ambiental en el que se le da el aprovechamiento de una cantera histórica de granito en Pena (Vila Real, Norte de Portugal). La ejecución de este proyecto tiene dos objetivos: Primero, para revivir la cantera histórica de Pena. En segundo lugar, promover la conservación sostenible del patrimonio cultural mediante la creación de un inventario de edificios de la ciudad de Vila Real contruidos con granito de Pena. Por lo tanto, permitirá el desarrollo económico de las comunidades locales utilizando el patrimonio construido vinculado a las piedras patrimoniales. La cantera de Pena será fuente de granito para posibles futuras restauraciones de los edificios históricos contruidos con él.

3.1.2 *Antecedentes Nacionales*

Travertinos de la cantera San Antonio, municipio de Villa de Leyva - Colombia. Avances en Caracterización física y mineralógica para su uso como roca ornamental. Este artículo muestra “La caracterización físico mecánica y mineralógica del travertino, extraído en la cantera San Antonio, Villa de Leyva, utilizado desde hace más de 50 años, con fines arquitectónico, uso en

cimentaciones, columnas y otros elementos estructurales entre otros.” (Buitrago Cárdenas, G. A., & Becerra Becerra, J. E., 2020).

Avances y Especificaciones Para Pavimentos En Piedra. Este documento de tesis en modalidad de monografía investiga la normatividad y avances técnicos relacionados con el uso de la piedra como superficie de rodadura en pavimentos. (Esquivel, 2013).

Estudio preliminar de las características petrográficas, petrofísicas y comportamiento mecánico de rocas naturales tipo “piedra bogotana” y “mármol royal bronce” utilizadas en construcciones patrimoniales y recientes en Colombia. 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 bronce, 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 (Rocha-Vargas et al., 2019).

En el libro, Recursos Minerales de Colombia vo1, capítulo 4, Becerra, J. E. y Pulido, O. (2019). Realizan una amplia descripción de los diferentes tipos de rocas ornamentales explotadas y empleadas en Colombia. (López, 1996) divide los diferentes tipos de roca en cuatro grupos, denominados genéricamente granitos, mármoles, pizarras y otras piedras (pág. 96), los cuales no necesariamente responden a su composición química o ambiente de formación. De igual forma se presentan algunas especificaciones mínimas y métodos de ensayo para algunas rocas ornamentales

en propiedades como: densidad aparente, absorción de agua aparente, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión.

Jonathan Patiño y Marco Antonio Suárez (2015). En su trabajo de grado investigación y caracterización de rocas ornamentales en la formación de los ingenieros civiles, buscan conocer y aprender sobre la terminología de rocas ornamentales utilizadas en la industria de la construcción y los diferentes tipos de ensayos de caracterización física, mineralógica, textural y envejecimiento acelerado que son utilizados en este tipo de rocas. En este trabajo de investigación realizan toma de muestras en dos canteras de rocas ornamentales, luego de lo cual realizan diferentes ensayos de laboratorio buscando determinar propiedades físicas básicas, análisis petrográfico y resistencia a los cambios de humedad, analizando y comparando los resultados de las dos canteras.

Urriola Rodríguez, M. (2020). Evaluación mineralógica, física y mecánica de las rocas serpentinitas de Ituango, NE de Colombia, para su uso como roca ornamental. Universidad EIA. Evalúa las serpentinas de Ituango bajo normatividad ABNT NBR 15845 modulo A, B, E y H, así como la A.S.T.M C-97, C-99, C-170 y la UNE-EN 12370, obteniendo en su mayoría resultados de índices físicos, y propiedades mecánicas compatibles con la normatividad. Mediante la difracción de rayos X y el SEM fueron discriminados los tipos de serpentinas, perteneciendo en su mayoría al grupo de antigorita y lizardita. Los estudios mineralógicos, químicos y físicos de las serpentinitas evaluadas permitieron indicar que cumplen las condiciones mínimas de los ensayos propuestos por la A.S.T.M. para rocas ornamentales.

Díaz Rodríguez, M., Forero Torres, K. (2018). Caracterización mineralógica y mecánica de rocas areniscas usadas en Tunja desde la colonia hasta la actualidad. Investigan con el fin de “conocer más acerca de las características de las rocas areniscas utilizadas en la ciudad de Tunja para la conservación de los monumentos y estructuras actuales, Para ello se realizaron análisis

petrográficos, ensayos físicos y mecánicos que nos brindaron más información sobre las rocas estudiadas como el comportamiento capilar, macroscopía, absorción, porosidad, reacción ante la cristalización de sales, y ensayos destructivos como la resistencia a la flexión y resistencia a la compresión, para comprender lo que demostró sus características como material de construcción y su comportamiento ante varios agentes a los que se vio expuesto.” (Pág. 10).

3.1.3 Características físicas químicas y texturales, factores de riesgo para el travertino

Benavente et.al. (2006), evaluaron las propiedades físicas y la utilización de las rocas ornamentales. El autor afirma que estas propiedades son importantes indicadores de calidad y así mismo, contribuyen fuertemente a la durabilidad del mismo material. Las propiedades físicas que definen la utilización del material como roca de uso ornamental son el sistema poroso, el comportamiento hídrico y las propiedades mecánicas, con la porosidad como característica más influyente en las propiedades físicas. El objetivo principal del estudio fue la determinación de las propiedades petrofísicas más importantes que contribuyen al uso de las rocas ornamentales. Así mismo, se hizo una descripción de los factores que hacen parte del comportamiento hídrico, y cada una de las propiedades físicas más importantes a determinar mediante ensayos de laboratorio.

Benavente et.al. (2009), determinaron en su investigación la influencia de las facies en las propiedades petrofísicas y la durabilidad del travertino clásico. Este travertino es explotado de Turquía y es ampliamente utilizado en construcciones de España. A partir de los ensayos para la determinación de las propiedades físicas y de durabilidad, se comprobó que el travertino clásico estudiado, posee un óptimo funcionamiento como roca ornamental. La investigación arrojó que la estructura y porosidad fenestral de este material, son los principales factores que influyen en la anisotropía observada en el mismo. La anisotropía del material hace referencia a la no uniformidad del comportamiento de un material en función del sentido en que es evaluado, el travertino por ser

un material formado por precipitación y cuyo comportamiento depende de factores biológicos y químicos exhibe una gran anisotropía, ya que su comportamiento muestra gran diferencia al evaluar algunas propiedades físicas en un eje hipotético x-x al eje y-y.

Becerra (2009), determinó la susceptibilidad a los procesos de deterioro de calizas de la formación de la Tampa empleadas en la construcción de edificios de la ciudad de Medellín, Colombia. En su investigación, hizo énfasis y gran mención a la porosidad del material, de la cuál afirmó que es un factor determinante en el deterioro observado, principalmente de la microporosidad como facilitador de procesos tales como la cristalización de sales, frecuentes en ciudades con un alto grado de contaminación y en ambientes litorales. (Citado de Buitrago & Becerra, 2020); Urosevic et.al. (2011), evaluaron detalladamente las propiedades físicas de dos rocas carbonáticas empleadas como material de construcción actual e histórico en Andalucía Oriental, España. Estas piedras calcáreas estudiadas fueron la calcarenita de Escuzar y el travertino de Olivillo, y se determinó su posible uso como material de sustitución de la calcarenita y de la Escribana, que son dos grandes componentes del patrimonio arquitectónico de Andalucía. Se llevaron a cabo estudios como la difracción y fluorescencia de rayos X, microscopia óptica y electrónica de barrido, ensayos hídricos, porosimetría de mercurio, adsorción de gas, ultrasonidos y colorimetría. A partir de los estudios realizados, se determinó que la calcarenita de Escuzar posee una mayor porosidad abierta que la calcarenita de la Escribana. Así mismo, se determinó que el Olivillo es una roca bien cementada y de color heterogéneo, y según los estudios realizados en este material, se estableció que posee muy buenas propiedades mecánicas. Sin embargo, las diferencias hídricas y cromáticas de estos travertinos, demuestran que el Olivillo tiene una menor adecuación como material sustitutivo del Alfacar.

Vargas M.A et al., (2014). Investigaron el reciente descubrimiento de un travertino localizado a 4 km de noroccidente del municipio de Pesca, Boyacá. Llevaron a cabo caracterización a nivel cartográfico, químico, petrográfico y palinológico con el fin de determinar sus propiedades y efectividad de la roca para su utilización como roca ornamental, su origen y composición. Como resultado de la investigación se determinó que el material que compone al travertino es en su mayoría roca calcárea que posee un alto grado de dureza y una porosidad significativa lo que traduce a estas propiedades como una baja conductividad térmica, un buen aislamiento acústico, y gran facilidad de realizar cortes.

García del Cura M.A et al., (2014). Investigaron los travertinos coloreados de baños de Mula. Los cuales tienen propiedades y buen comportamiento hídrico. El objetivo de este artículo fue contribuir con datos sobre las características de esta roca y su implementación en la construcción de obras civiles, así como sus características petrográficas – mineralógicas con enfoque a establecer su origen. Los materiales travertinos se estudiaron mediante microscopia óptica de polarización y microscopio electrónico de barrido con el fin de lograr una caracterización mineralógica se empleó difracción de rayos X, resultado de la caracterización física, mecánica y mineralógica como resultado los travertinos de Baño de Mula poseen buena resistencia mecánica a esfuerzos deformantes perpendiculares a la estructura general de la roca, con un comportamiento hídrico aceptable, de carácter anisotrópico.

García del Cura M.A et al., (2017). Estudiaron los travertinos colorados de la zona Bética Externa cuyas características son poco conocidas con el fin de definir las facies (texturas y estructuras) y características petrofísicas que presentan con vistas para su utilización como roca ornamental, los autores realizaron estudio petrográfico con microscopia óptica de polarización , caracterización mineralógica con difracción de rayos X, comparando la situación y contexto

geológico y características petrofísicas de tres zonas diferentes Travertinos de Alhama de Almería, Travertinos de Albox y Travertinos de Mula, donde se valoró que las propiedades mecánicas de las tres variedades locales muestran un comportamiento relativamente similar que incluye una notable anisotropía. Es importante reconocer, que hubo aportes en la descripción y análisis científicos de los depósitos carbonáticos en la antigüedad. Entre ellos se destacan: Von Buch (1809) quién realizó la descripción de los depósitos de la ciudad de Tívoli, Italia. Así mismo, Lyell (1829), describió las tobas británicas. Cohn (1862), realizó estudios en los travertinos de Carlsbad e Italia (1864). Weed (1889), fue el pionero de la descripción de los depósitos silíceos y carbonáticos del parque Nacional Yellowstone en conjunto con Emig (1917) que realizó estudios acerca de los travertinos de las Arbuckle Mountains. (Rodríguez, 2018).

Barbosa Troncoso C et al., (2018). Desarrollaron su tesis en la caracterización morfológica, textural, mineralógica y geoquímica de travertinos formados de vertientes termales. El objetivo de su tesis fue comprender los procesos de formación de depósitos de travertinos mediante la hidrogeoquímica de los fluidos parentales y estudio de sus morfologías, texturas, mineralogía y geoquímica. Para la clasificación morfológica de los travertinos realizaron una campaña de tres días describiendo las morfologías y rasgos texturales visibles, utilizando como métodos analíticos la difracción de rayos X para la identificación de los minerales que componen al travertino, como resultado a los ensayos realizados, se concluyó que la formación de estos travertinos está dada por fuentes termales de origen meteórico, el agua de éstas fuentes desciende mediante fallas y fracturas a niveles profundos, donde es enriquecida en CO₂, calcio y especies carbonatadas, posteriormente, estos fluidos ascienden a la superficie, proceso en el cual escapa CO₂ a la atmósfera y ocurre la precipitación de carbonato de calcio, lo que formó los depósitos de travertino de Baños azules.

Nasri et.al. (2018), realizó una investigación acerca de los fenómenos de meteorización que afectan las construcciones bizantinas de Argelia, África. Estas construcciones, como el muro bizantino que él estudió, se componen en gran medida de travertinos. El autor determinó en su estudio, formas de meteorización tales como: alveolización, eflorescencias, decoloración y erosión en forma de pérdida de material y arenización, afirmando que estos factores son determinantes en el deterioro de estas estructuras y se deben realizar mejoramientos en las mismas. (Citado en Buitrago & Becerra, 2020).

En el artículo Caracterización física y mineralógica del travertino para su uso como roca ornamental de Buitrago Cárdenas, G. A., & Becerra Becerra, J. E. (2020). muestran de forma muy concreta los resultados obtenidos de la caracterización física, mecánica y mineralógica del travertino extraído de la cantera San Antonio, ubicada en Villa de Leyva, Colombia; el objetivo de esta investigación es establecer las características físicas, mecánicas y mineralógicas del travertino. En esta investigación se realizaron ensayos de laboratorio como: Caracterización macroscópica, reactividad química, permeabilidad, caracterización mineralógica y petrográfica, 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; Como resultado a los ensayos realizados, indican que el travertino de Villa de Leyva, presenta alta susceptibilidad al deterioro ante los procesos climáticos y/o ambientales debido a su alta porosidad y facilidad de infiltración de agua, lo cual indica que su vida útil es corta.

Rocha Vargas D.C et al. (2019). Investigaron la caracterización tecnológica de dos variedades de rocas “Piedra Bogotana y Mármol Royal Bronze”. Los métodos de ensayo empleados para determinar propiedades petrofísicas y mecánicas fueron: el análisis petrográfico, índices físicos como (densidad aparente, porosidad aparente y absorción de agua aparente),

resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia al desgaste y resistencia al impacto. El objetivo de esta investigación fue determinar que la piedra bogotana en sus dos variedades (amarilla y rosada) pueda ser utilizada como elemento estructural y así mismo que el Mármol Royal Bronze pueda ser utilizado como cualquier tipo de revestimiento de paredes, pisos y paredes de alto tráfico.

En la determinación de la resistencia a la compresión en estado seco, indican que las tres rocas analizadas son aptas o aceptables para la utilización en obras civiles como elementos estructurales. Morales Tassinari A.M et al., (2019). Investigaron sobre la caracterización físico-mecánica, de dos travertinos extraídos de canteras diferentes (Ejido y Ixcaquixtal), para la caracterización física, se emplearon ensayos de absorción y densidad, y para la caracterización mecánica, utilizaron el ensayo de compresión uniaxial. Con la implementación de estos ensayos y sus resultados, se pudo determinar que el travertino de la cantera Ejido y el Travertino dorado de la cantera Ixcaquixtal, poseen propiedades satisfactorias de absorción, densidad y resistencia. Esta comparación se realizó para establecer qué material posee mejores características que determinan su funcionalidad en su uso arquitectónico.

Buitrago & Becerra (2018), realizaron la caracterización física y mineralógica de los travertinos de la cantera San Antonio de Villa de Leyva, Boyacá. En esta investigación se llevó a cabo la caracterización de la composición mineralógica del material, además se realizaron ensayos de densidad aparente, porosidad aparente, absorción de agua aparente, permeabilidad, capilaridad y resistencia a la compresión con el objetivo de determinar de manera preliminar, las características que definen el uso de este material, como roca ornamental en las obras. En este estudio, se concluyó que la roca estudiada, cumple con los requisitos y características para su uso en revestimientos de muros internos y fachadas internas y externas.

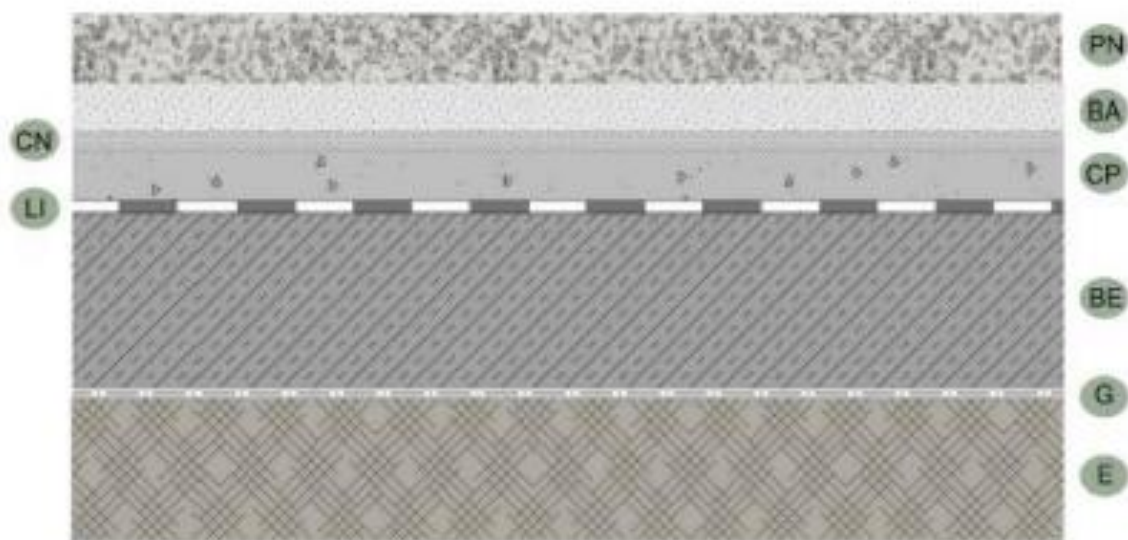
3.1.4 La Piedra Natural Como Pavimento Peatonal

Teniendo en cuenta la inexistencia de normatividad colombiana en lo referente al diseño de pavimento peatonal exterior e interior usando piedra natural como material de acabado, se ha realizado una exhaustiva investigación para determinar los diferentes factores y normatividad internacional a tener en cuenta para uso del Travertino para este fin.

Siguiendo recomendaciones de la *Guía Para el Diseño, Construcción y Mantenimiento de Pavimentos Exteriores de Piedra Natural*, emitida por la fundación centro tecnológico *Clúster del Granito*, la subestructura antes de las losas de piedra natural debe contar con los siguientes elementos: base de apoyo y adherencia, capa de nivelación, lámina impermeable, base estructural, lamina geo textil, sub base granular (Esquivel, 2013). La distribución de estos elementos se presenta en la **Figura 1**.

Figura 1

Subestructura pavimento peatonal.



Nota. Citado en *Avances y especificaciones para pavimentos en piedra*. Esquivel (2013).
Estructura de pavimento. (Pág. 20).

Nota. PN: pavimento de piedra natural; BA: base de apoyo y adherencia; CN: capa de nivelación; CP: capa para formación de pendientes; LI: lamina impermeable; BE: base granular; G: geotextil; E: explanada. Reproducida de: Guía Para El Diseño, Construcción Y Mantenimiento De Fachadas De Piedra Natural, 2012.

Subrasante: es la superficie terminada sobre el terreno natural sobre la cual se apoyará la estructura del pavimento y cuya calidad se define a partir del índice CBR (California Bearing Ratio), parámetro empleado para caracterizar su capacidad portante. Este ensayo se realiza bajo los parámetros de la norma UNE 103502.

Subbase granular: corresponde a la porción de material granular situada entre la base y la subrasante, su espesor se determina Dependiendo del nivel de CBR presente en el suelo natural. Cuando el índice CBR es inferior a 5 se debe adicionar 45 cm de subbase granular.

Base estructural: realiza una función de resistencia del pavimento, normalmente está conformada por materiales con cierto contenido granular y que, además ofrecen propiedades como la fácil compactación por medios mecánicos.

Capa de apoyo: esta capa es la que se encarga de realizar el proceso de apoyo y adherencia de la piedra con las demás partes de la estructura del pavimento. En la práctica, la capa de apoyo puede estar conformada por arena o mortero y podría tener un espesor típico de 4 cm a 6 cm, también se podría usar una placa de concreto o concreto preexistente.

Superficie de piedra natural: esta capa corresponde a la superficie de la estructura del pavimento, la literatura internacional también menciona que el acabado de piedra natural debe tener un acabado rugoso, suficiente para que exista una adecuada adherencia entre el transeúnte y la superficie de piedra natural.

Elementos adicionales: adicional a los elementos que componen la estructura principal del pavimento se tienen otros elementos que también se deben incluir, tal como se describe a continuación. Las juntas de pavimento son elementos divisorios entre las placas de piedra pegada que se emplean para fraccionar el pavimento, esto con el fin de absorber los movimientos originados por las solicitaciones presentes. Entre estas se encuentran las juntas de fraccionamiento, juntas de encuentro o contorno y juntas de unión. El tamaño y la disposición de estas juntas dependen del coeficiente de dilatación que tenga la piedra y de su sensibilidad ante la presencia de agua. Debe tener un espesor tal que afecte del espesor de la baldosa y al material de adherencia, y debe tener un ancho de al menos 10 cm. Se deben ubicar separando unidades de pavimentación equivalentes a 50 metros cuadrados u ocho metros lineales como máximo. Las principales características que deben tener los materiales para juntas son: deformabilidad y adaptabilidad adecuada a los movimientos previsibles, resistencia adecuada según el uso previsto, impermeabilidad, durabilidad entre otros (Esquivel, 2013).

3.1.5 Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión es la característica más relevante en la piedra natural cuando la misma se destinará a pavimento de cualquier tipo, debido a la forma plana de las placas de travertino, que hace que éstas desde el punto de vista mecánico trabajen principalmente a flexión, y debido también a la estructura interna heterogénea de la piedra caracterizada por la existencia de planos internos de debilidad a una o varias escalas como lo son: contactos entre granos, juntas, laminaciones, foliación, etc., que son los que condicionan finalmente su resistencia. (Molina, 2017)

La declaración de la resistencia a la flexión por el fabricante se considera obligatoria tanto para pavimentos de exterior como de interior en el mercado común europeo, puesto que constituye

una característica esencial en los anexos Z de las normas UNE-EN 1341, UNE-EN 1469, UNE-EN 12057 y UNE-EN 12058 y por tanto forma parte de la información de la declaración de prestaciones y el marcado CE. (Molina, 2017).

La resistencia a la flexión se determina mediante cualquiera de los dos métodos normalizados existentes:

- UNE-EN 12372, Resistencia a la flexión bajo carga concentrada (Rtf).
- UNE-EN 13161, Resistencia a la flexión a momento constante (Rtc).

El primero de estos métodos es el más habitual, mientras que el segundo es el más fiable en rocas con fuertes discontinuidades (juntas o laminaciones) o de tamaño de grano grueso, en las que tiende a obtenerse un valor de resistencia más bajo con el método de la norma UNE-EN 13161. En materiales completamente homogéneos se obtendría igual resultado por cualquiera de los dos métodos. (Molina, 2017).

La resistencia a la flexión es una característica del material que depende fundamentalmente de las fuerzas de unión Inter partícula y es teóricamente independiente de las dimensiones de la probeta(Molina, 2017). Sin embargo, cuando el espesor de la placa en uso o probeta en análisis es menor que el tamaño de las discontinuidades, se obtienen resistencias mucho menores. Por esta razón los ensayos de identificación del producto han sido establecidos para espesor $\geq 25 \text{ mm}$. Esta puede ser una causa importante de error en la selección del producto, por lo que siempre será recomendable usar espesores de placa mayores a 25 mm, o realizar el ensayo sobre el producto terminado con sus dimensiones finales y su acabado superficial. (Molina, 2017)

Puntualizando la inexistencia de normatividad para el uso de la piedra natural como pavimento exterior, se encuentra que es en el mercado común europeo, de obligatoriedad para el fabricante o proveedor, publicar la resistencia del material que ofrece mediante 3 valores:

- valor medio ($R = R_{tf}$ o R_{tc})
- desviación típica (s)
- mínimo valor esperado (E_R)

Dado que la resistencia a la flexión a menudo resulta crítica para la adecuación al uso previsto, y teniendo en cuenta que suele presentar una variabilidad muy alta, son frecuentes los coeficientes de variación de entre el 10 y el 30%, el valor de diseño deberá ser siempre E_R o valor mínimo esperado, el cual representa el fractil inferior de una distribución log-normal, con una probabilidad aproximada del 95%. Cuando éste no se conozca, podrá sustituirse por $R-2s$, lo anterior, según la norma UNE-EN 13161.

3.1.6 Valor esperado de resistencia a flexión para piedra natural

Si bien en la normatividad europea no se especifica un valor mínimo de resistencia a la flexión para piedra natural destinada a pavimento exterior, las normas norteamericanas ASTM sí establecen valores recomendados para la resistencia a la flexión en función del tipo de roca:

Tabla 1

Especificaciones para el módulo de rotura ASTM C99 (equivalente a la resistencia a la flexión bajo carga concentrada) en las normas ASTM.

Tipo de roca	R (MPa)
Mármol (ASTM C503)	7
Caliza densa > 2560 kg/m ³ (ASTM C568)	6,9
Caliza densidad media 2160 - 2560 kg/m ³ (ASTM C568)	3,4
Caliza baja densidad 1760 - 2160 kg/m ³ (ASTM C568)	2,9
Granito (ASTM C615)	8,3
Areniscas (ASTM C616)	2,4
Cuarcitas (ASTM C616)	13,9
Serpentinas (ASTM C1526)	6,9
Travertinos para exteriores (ASTM C1527)	6,9
Travertinos para interiores (ASTM C1527)	4,8
Pizarras para exteriores (ASTM C629)	62,1

Nota. Reproducida de ASTM C1527-11/C1527M-11 Standard specification for travertine dimension stone.

3.1.7 Diseño y predimensionado del pavimento peatonal en piedra natural según norma UNE-EN 1341 anexo A

Antes de establecer el valor de la resistencia a flexión (R) que deberá ofrecer el material a instalar; deberán tenerse en cuenta las condiciones del uso al que se someterá el material y la carga

de rotura que satisfacen dichas condiciones. Para ello se podrá aplicar la siguiente expresión, deducida de la norma UNE-EN 1341 Anexo A:

Ecuación 1

$$R = \frac{3 \times F \times L \times S}{2 \times W \times t^2}$$

Donde;

t espesor de la baldosa, en mm

L longitud de la baldosa, en mm

W ancho de la baldosa, en mm

F carga de rotura, en N (**Tabla 2**)

S factor de seguridad (**Tabla 3**)

Tabla 2

Valores de carga de rotura mínima F establecidos para diferentes usos típicos en pavimentos de exterior (UNE-EN 1341 Anexo A).

Uso característico (exterior)	F (N)
Baldosas embebidas en mortero y áreas peatonales únicamente	750
Escaleras	2000
Áreas peatonales, para bicicletas, jardines y balconadas	3500

Uso característico (exterior)	F (N)
Accesos ocasionales de coches, vehículos ligeros, motocicletas y entradas de garajes	6000
Aceras y áreas comerciales con uso ocasional de vehículos de emergencia o de transporte	9000
Áreas peatonales utilizadas frecuentemente con cargas pesadas	14000
Carreteras, calles y gasolineras	25000

Nota. Reproducido de UNE-EN 1341 Anexo A

Tabla 3

Valores del factor de seguridad S para diferentes sistemas de colocación de pavimentos (UNE-EN 1341 Anexo A y UNE 22202-1).

Dimensiones	Apoyado sobre base rígida (mortero)	Apoyado sobre base flexible (arena)	Baldosa al aire (pavimento elevado registrable)			Peldaño al aire sobre 2 lados
			4 lados	2 lados	4 esquinas	
Lado ≤ 600 mm	1,2	1,8	2,4	2,7	3,0	6,0
Lado > 600 mm	1,8	2,4	2,7	3,1	3,5	6,0

Nota. Reproducido de UNE-EN 1341 Anexo A

Espesor mínimo de rotura. La resistencia a la flexión se emplea para determinar el espesor mínimo (t) de una baldosa o placa con dimensiones en planta conocidas para satisfacer una determinada carga de rotura prescrita. El método de cálculo se describe en la norma UNE-EN 1341.

Ecuación 2, espesor mínimo de rotura

$$t = \sqrt{\frac{3 \times F \times L \times S}{2 \times W \times E_R}}$$

En muchas ocasiones se producen roturas debidas a un error en el dimensionamiento de las baldosas. En tales casos se debe recalcular el espesor de acuerdo con la ecuación 2, para lo cual es recomendable prever en el suministro una pequeña partida de baldosas de mayor grosor (Molina, 2017).

3.1.8 Caracterización tecnológica del Travertino de Málaga

Según la investigación bibliografía plasmada anteriormente, para conocer a cabalidad las propiedades básicas de circulación de fluidos, índices físicos, composición química y comportamiento mecánico esperado, teniendo en cuenta su uso como pavimento peatonal se realizará los ensayos de laboratorio plasmados en la **Tabla 4** siguiendo la normatividad allí expresada.

Tabla 4

Métodos de ensayo de Caracterización Tecnológica en Rocas Ornamentales empleados en este trabajo.

Método de ensayo	Finalidad	Descripción del método	Normas internacionales
Índices Físicos (Densidad Aparente, Porosidad Aparente y Absorción de Agua)	Determinar la incidencia de los espacios vacíos, las micro discontinuidades, y los valores de la absorción de agua de la roca, en la resistencia mecánica de la misma.	6 probetas cúbicas de 5 cm de arista previamente secadas (<i>Msec</i>) se sumergen en agua destilada hasta alcanzar la saturación (<i>Msat</i>); posteriormente se realiza pesaje hidrostático (<i>Mim</i>). Por diferencia de masas se realizan los cálculos.	UNE 22-172, 182 Y 191 ABNT NBR 15845: 2010(B) ASTM C97
Análisis Químico	Conocer la composición química porcentual de una roca	Se determina el contenido porcentual de algunos elementos químicos por Fluorescencia de rayos X o Difractometría de rayos X.	
Resistencia a la Flexión	Evaluar la idoneidad del Travertino de Málaga como pavimento peatonal.	Seis probetas prismáticas de dimensiones correspondientes a 4pulgadas x 8pulgadas x 2.25 pulgadas, son ubicadas en una prensa hidráulica por medio de la cual se aplica una carga a velocidad constante hasta rotura.	UNE 22-176, 186 Y 195 ASTM C1527: C99

Nota. Modificado de Rocha Vargas D.C et al (2019).

4 Materiales y Métodos

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos, se desarrollarán actividades planificadas en 2 fases principales desarrolladas en orden cronológico:

- Trabajo de campo
- Trabajo de laboratorio

4.1 Trabajo de Campo

Este capítulo aborda las actividades de campo realizadas, así como los datos obtenidos a partir de ésta, los cuales se presentan cronológicamente a continuación: investigación bibliográfica de los sitios de estudio, georreferencia de puntos de interés, registro fotográfico, geología a partir de coordenadas y observaciones tomadas durante la salida, métodos de explotación del material travertino, generalidades de la cantera y ejemplos de uso del material Travertino de Málaga en la zona aledaña a la cantera La Primavera.

4.1.1 Localización

Tunja Boyacá. La capital boyacense se encuentra en la cordillera oriental a 115 kilómetros al noreste de Bogotá DC, es la capital más alta de Colombia al encontrarse a 2810 metros sobre el nivel del mar. El travertino objeto del presente estudio fue usado en la plaza de Bolívar de la ciudad de Tunja, que es epicentro cultural, recreativo, turístico y político de la ciudad, en el área circundante de la plaza de Bolívar se encuentran importantes entidades como, la gobernación de Boyacá, la alcaldía mayor de Tunja, las oficinas de la DIAN, y de más comercios de vital importancia para la ciudad, lo que sumado al aforo turístico del centro histórico somete al material empleado como recubrimiento de dicha plaza a solicitudes mecánicas importantes dado el alto tráfico peatonal que confluye en ella.

A continuación, se muestran las coordenadas referidas al datum MAGNA SIRGAS BOGOTÁ Colombia de los puntos que conforman el polígono de estudio Plaza de Bolívar de la Ciudad de Tunja:

Tabla 5

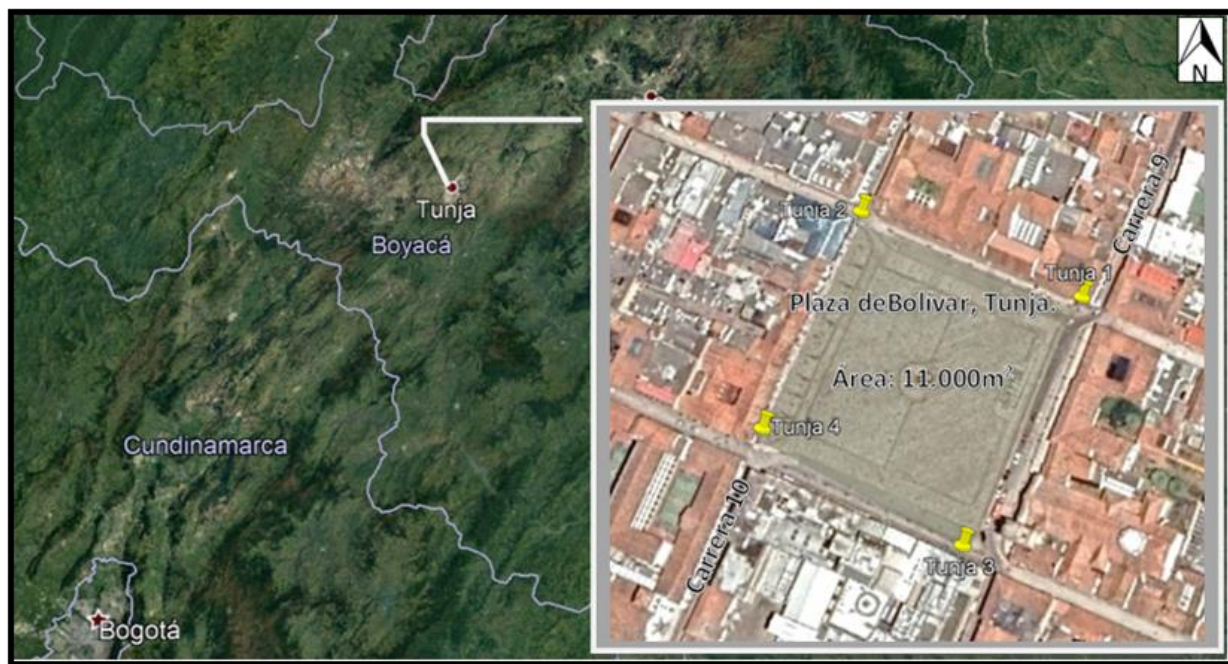
Coordenadas Geográficas y Planas del Sitio De Estudio

<i>No Punto de referencia</i>	<i>Coordenadas Geográficas</i>		<i>Coordenadas Planas</i>	
	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Norte (m)</i>	<i>Este (m)</i>
T-1	5°31'58.06"N	73°21'39.56"O	1103619,201	1079395,449
T-2	5°31'59.05"N	73°21'42.92"O	1103649,489	1079291,987
T-3	5°31'54.36"N	73°21'40.90"O	1103505,486	1079354,339
T-4	5°31'55.73"N	73°21'43.93"O	1103547,460	1079261,020

Estas coordenadas corresponden a la carta geológica de Tunja que en nomenclatura propia del IGAC corresponde a la plancha número 191-I-D-3. (Ver **Figura 2**).

Figura 2

Ubicación puntos: T-1, T-2, T3 y T-4.



Nota. Adaptada de plaza de Bolívar Tunja Boyacá, Google, (S.F).

Cantera La Primavera (Málaga). El travertino usado como recubrimiento y pavimento peatonal en la plaza de Bolívar de Tunja Boyacá es extraído en la ciudad de Málaga Santander, ciudad ubicada a 362.8 km de la capital colombiana y a 223.6km de la capital boyacense, el recorrido de Tunja, Boyacá a Málaga, Santander; se realiza en aproximadamente 6 horas por carretera. El travertino de Málaga, Santander es explotado por la empresa Travecol S.A.S. de manera completamente legal desde el año 2010. Cuenta con una cantera de aproximadamente 34.069m² la cual se ubica en la vereda Calichal y es conocida como La Primavera, está ubicada aproximadamente a 10 km de la ciudad de Málaga como se aprecia en la **Figura 3** y cuya entrada corresponde a las coordenadas 6°43'30" N; 72°42'31" O a una altura sobre el nivel del mar de 1810 metros.

A continuación, se muestran las coordenadas referidas al datum MAGNA SIRGAS BOGOTÁ Colombia de los puntos que conforman el polígono de estudio cantera La Primavera en zona rural del municipio de Málaga:

Tabla 6

Coordenadas Geográficas y Planas del Sitio De Estudio

<i>No Punto de referencia</i>	<i>Coordenadas Geográficas</i>		<i>Coordenadas Planas</i>	
	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Norte (m)</i>	<i>Este (m)</i>
<i>P-1</i>	6°43'19.08"N	72°42'25.03"O	1235290,684	1151541,546
<i>P-2</i>	6°43'30.51"N	72°42'36.40"O	1235640,853	1151191,431
<i>P-3</i>	6°43'29.53"N	72°42'37.28"O	1235610,544	1151164,410
<i>P-4</i>	6°43'26.06"N	72°42'37.17"O	1235503,916	1151168,170
<i>P-5</i>	6°43'27.67"N	72°42'36.42"O	1235553,616	1151191,133

Figura 3

Ubicación cantera la primavera. Geología correspondiente a la plancha 136 del IGAC



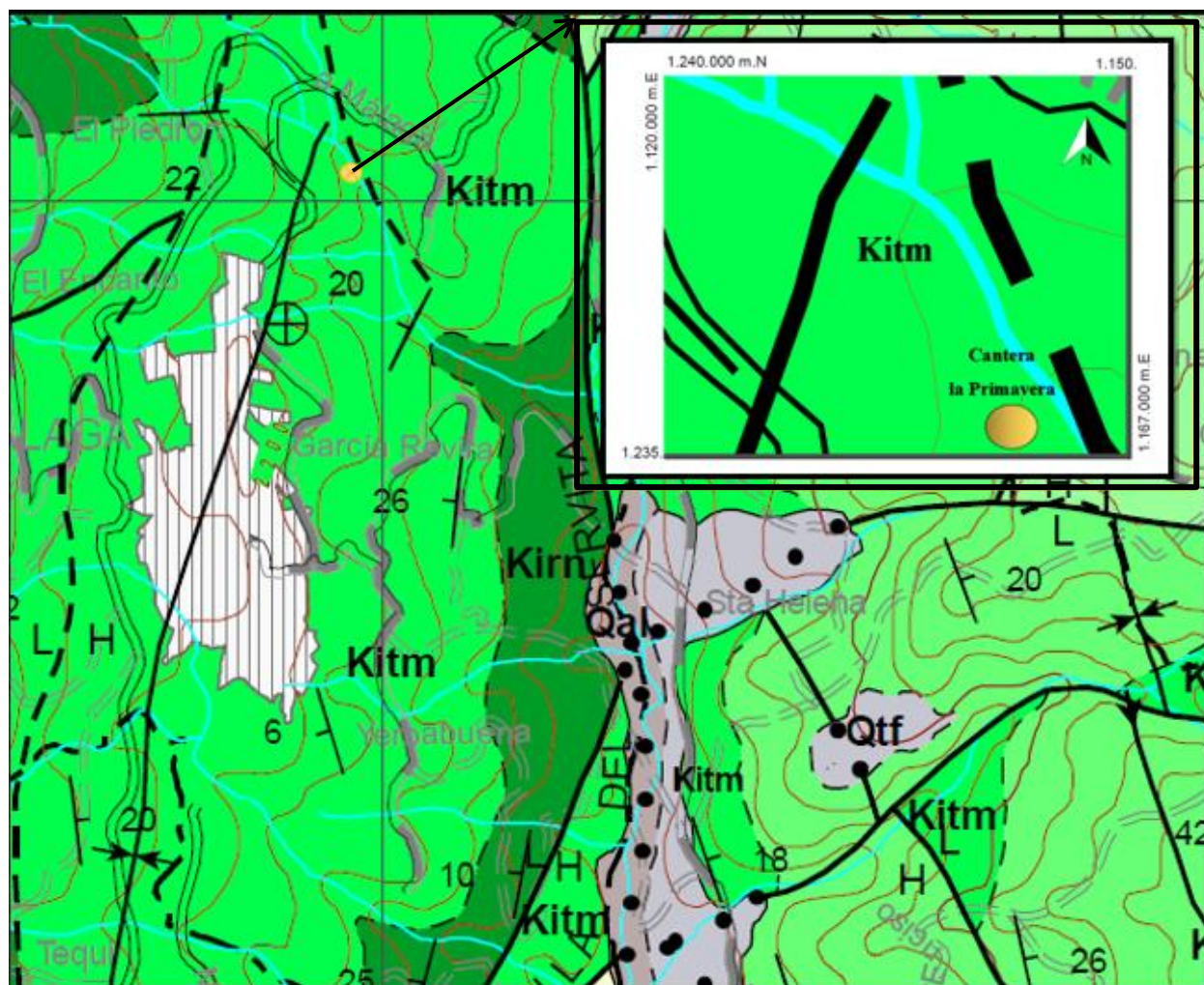
Nota. Adaptada de georreferencia cantera La Primavera, Bing Maps, (S.F)

4.2 Marco Geológico

4.2.1 Geología del sector

Figura 4

Geología de la cantera La primavera ubicada en la plancha 136 del IGAC.



Nota: Adaptado de Geología de la Plancha 136 Málaga, Vargas et al., 1986, Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS, © 1984 – INGEOMINAS versión digital (2009).

La zona de estudio denominada Cantera la Primavera, se localiza sobre la formación Tibú-Mercedes, la cual se conforma de la siguiente manera:

- SUPERIOR: arcillas negras laminadas con intercalaciones arenáceas.

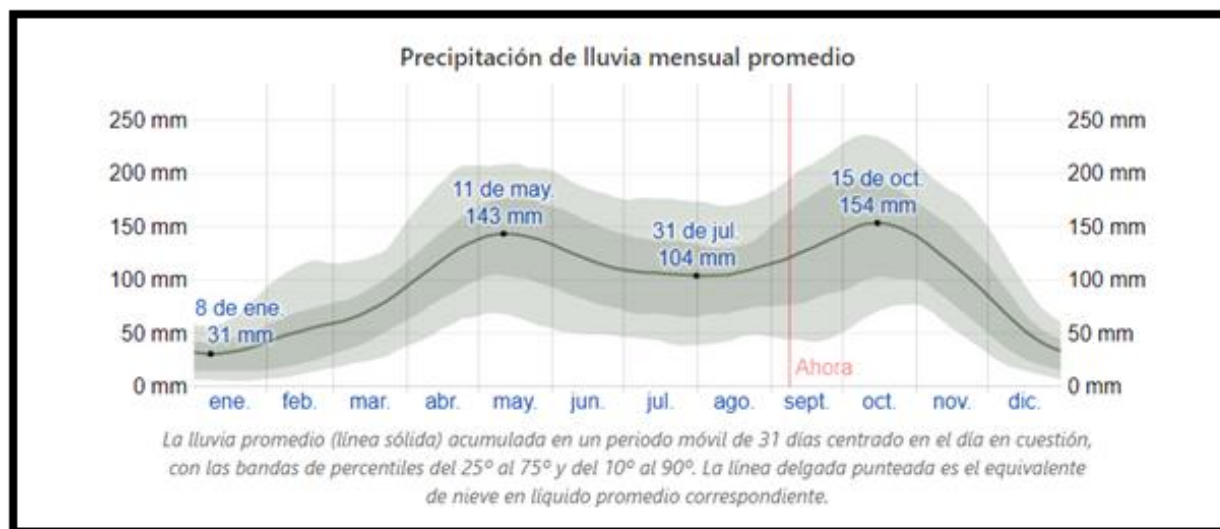
- PARTE INTERMEDIA: calizas gris oscuras, compactas, fosilíferas.
- PARTE INFERIOR: areniscas blancas cuarcíticas de grano fino a grueso, a veces conglomeráticas.

En cercanía a la zona es posible identificar un depósito fluviolacustre, cuyos materiales han sido aportados por un afluente que confluye al río Servitá. De manera general la zona presenta topografía con pendientes igual o menores al 10%, de suave geomorfología correspondientes a laderas suaves y onduladas.

La principal estructura que tiene influencia en el área es un sinclinal definido, ubicado a 600 metros al oeste de la zona de estudio, tiene una longitud aproximada de 13 kilómetros y se extiende desde cercanías del municipio San José de Miranda, atravesando la ciudad de Málaga y finalizando a poco más de 1.5 kilómetros del sitio de estudio, 500 metros al este de la cantera Primavera, se encuentra una falla inferida.

4.2.2 Clima

Málaga es un municipio caracterizado por sus largos veranos, manteniendo una temperatura promedio de 19°C. El mes con mayor precipitación es octubre, con un promedio mensual de 154mm/mes, mientras que las precipitaciones anuales promedian 1200mm/año.

Figura 5*Climograma municipio de Málaga*

Nota. Reproducida de promedio mensual de lluvia en Málaga, Weather Spark, 2021, <https://es.weatherspark.com/y/25290/Clima-promedio-en-M%C3%A1laga-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>

4.2.3 Generalidades cantera La Primavera

Cantera La Primavera es la única en producción actualmente de la empresa Travecol S.A.S. y la única que produce el conocido Travertino de Málaga, el cual ha tenido gran renombre luego de ser usado en la plaza de Bolívar de la ciudad de Tunja-Boyacá, en el parque central del municipio de San José de Miranda y en algunos centros comerciales como, por ejemplo, el centro comercial "Primavera Urbana" de Villavicencio. La cantera lleva en producción desde el año 2010 y ofrece gran variedad de productos a base de Travertino tipo romano.

4.2.3.1 Cantera y proceso de extracción empleado

La cantera está ubicada sobre una zona de ladera en un terreno con una pendiente que varía de los 8 a los 12 grados de inclinación en las zonas más pendientes, en la figura 6, se puede apreciar la cantera desde una panorámica que permite ver el avance y su frente de explotación.

Figura 6

Cantera la primavera.



Esta cantera como la gran mayoría de las explotaciones de este tipo utiliza el método de banco (Figura 7), el cual se basa en la extracción de grandes bloques en forma de paralelepípedos los cuales son transportados con maquinaria tradicional a la planta de beneficio ubicada a poco menos de 600 metros del frente de explotación. Cantera La Primavera cuenta ya con 4 bancos abiertos en forma de media elipse, de los cuales el que alcanza la mayor altura es el banco 3 que llega a tener una altura de banco aproximada de 5 metros y es el que posee la mayor anchura de tajo o banco de trabajo, llegando a tener cerca de 10 metros como ancho de tajo lo que facilita el proceso de corte, carga y transporte de los bloques en cuestión. En su gran mayoría, el ángulo de cara de banco, se aproxima a 90° .

Figura 7

Método de banqueo, en cantera La Primavera.



Las condiciones hidrológicas de la cantera son favorables, no se presentan aguas libres abundantes en ninguno de los bancos de explotación, aunque si se presenta humedad en el costado oeste de la cantera, la pendiente del terreno natural en el que se ubica dicha cantera contribuye a la evacuación rápida de aguas lluvias y aguas utilizadas en el proceso de corte, el cual al ser por hilo diamantado utiliza agua como lubricante para el corte de los bloques de travertino (**Figura 8**).

En general, el travertino encontrado en los cuatro bancos de explotación presenta fracturas con frecuencias de aproximadamente 2 a 4 metros, en el banco 4 ubicado a mayor altura y cercanía a la capa vegetal se observan sistemas de diaclasas y mayor porosidad que en los bancos inferiores,

mientras que en el travertino perteneciente al banco 3 se observa menor fractura miento y diaclasamiento y por lo mismo mayor calidad.

El proceso de extracción consiste en el corte de bloques de 1 m de sección por 5 m de alto usando hilo diamantado como se aprecia en la **Figura 8**, para el movimiento de los bloques extraídos se utiliza maquinaria convencional como lo es: retroexcavadora, bulldozer y volqueta. Luego del proceso de corte, los bloques son llevados a la planta de corte y pulido, ubicada a poco menos de 1 kilómetro de la cantera (**Figura 9**).

Figura 8

Corte con hilo helicoidal.

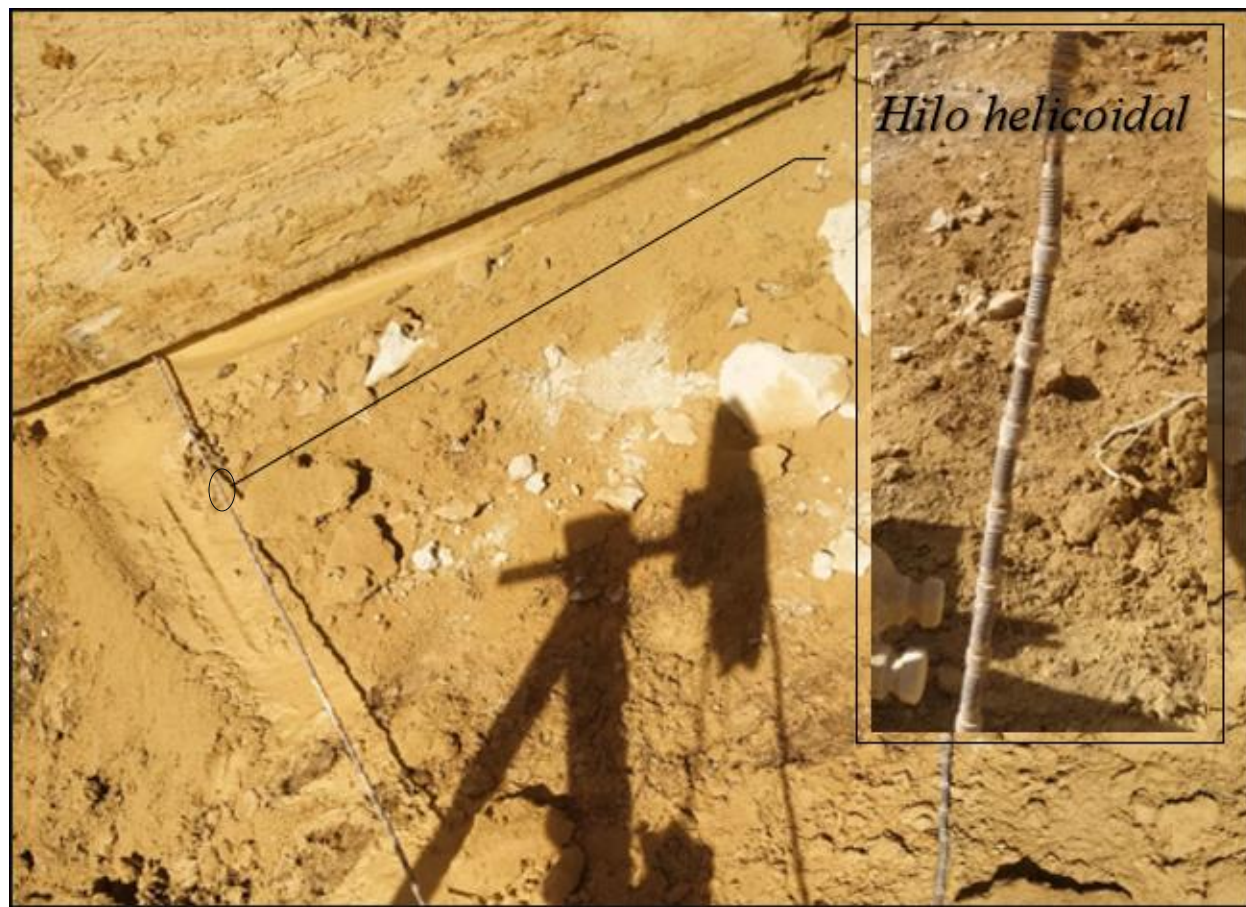


Figura 9

Planta de corte y acabado.



Nota. Adaptado de georreferencia cantera La Primavera, Google, (S.F).

4.2.4 Uso del travertino de Málaga en la región aledaña

Málaga, ciudad ubicada a pocos kilómetros de la cantera La Primavera, y cual fuera hace algunas décadas la capital del departamento de Santander, cuenta con una plaza central como es costumbre en municipios y ciudades colombianas, misma que en éste caso fue adornada en piedra natural ornamental correspondiente a Travertino de Málaga como se muestra en la **Figura 10**, donde se aprecia el uso del travertino en los escalones del templo principal, el sócalo del mismo y como material primario para la pieza conmemorativa e informativa ubicada en la plaza central.

Figura 10

Uso del Travertino, Catedral Inmaculada Concepción y placa conmemorativa. Málaga.



De igual forma, este precioso material ornamental ha sido usado en aceras y fachadas como la perteneciente a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) sede Málaga, se puede observar en la Figura 11.

Figura 11

Fachada de Unad en Travertino de Málaga.



Sin lugar a duda el ejemplo más diciente de la belleza en el uso del travertino de Málaga se encuentra en el municipio de San José de Miranda, lugar donde desde febrero de 2019 se puede disfrutar del parque principal Adolfo Roa Rodríguez y la iglesia Santuario Nuestra señora de los Remedios que como se aprecia en la **Figura 12**, hace gala de un pavimento peatonal y recubrimiento ornamental enteramente en Travertino de Málaga.

Figu12

Parque Principal, Adolfo Roa Rodríguez, San José de Miranda



Nota. (1) parque principal San José de Miranda utiliza mármol travertino como recubrimiento en fachadas y peatonal. (2) Travertino de Málaga en la Iglesia Santuario Nuestra señora de los Remedios.

5 Trabajo de Laboratorio

Para el desarrollo de esta investigación se procede al estudio en laboratorio del travertino siguiendo normatividad internacional. Los procedimientos de laboratorio se realizan siguiendo las normas europeas UNE-EN, brasileñas ABNT NBR y americanas ASTM. Durante la fase de laboratorio se determinan las propiedades mineralógicas, químicas y texturales del travertino de Málaga, además de las características físico-mecánicas y las propiedades básicas de circulación de fluidos del travertino. Lo anterior siguiendo normatividad y procedimientos fruto de la investigación bibliográfica sintetizada en la **Tabla 4**.

5.1.1 Preparación de las probetas

El material a emplear es travertino proporcionado por Travecol SAS, el travertino en cuestión no cuenta con procesos de pulido y acabado, se procede con la preparación de las probetas para la serie de ensayos de laboratorio a desarrollar, normatividad internacional como: UNE-EN 1936:2007 y ABNT NBR 15845: 2010(B) coincide con parámetros mínimos que deberán cumplir las probetas, estos requerimientos mínimos son:

- Los ensayos de laboratorio se realizarán sobre un mínimo de 6 probetas que podrán tener forma cilíndrica, cubica o prismática.
- El volumen aparente de cada una de las probetas de ensayo (*vap*), deberá ser igual o superior a 60ml.
- La relación entre el área de la superficie de la probeta en cuestión y el volumen aparente, debe estar comprendido entre 0,2 y 0,8mm⁻¹.

Teniendo en cuenta los puntos anteriores, se realiza el corte de las probetas en forma cubica con lados de 50 milímetros cumpliendo con los requisitos mencionados, se asignan caracteres alfa numéricos para facilitar su trazabilidad y seguimiento en los diferentes ensayos de laboratorio

nombrando las probetas con las siglas TM y añadiendo un sub índice numérico del 1 al 6 como se muestra en la **Figura 13**.

Figura 13

Identificación y Numerado de las Probetas a estudiar.



5.1.2 Caracterización Física Y Propiedades Básicas De Circulación De Fluidos

Índices físicos. Se obtienen a partir de las especificaciones de la norma (NBR 12766,1992) y norma (UNE-EN 1936:2007), o método de los 3 pesajes, mediante el cual se determina la densidad aparente seca o m_{sec} , densidad aparente saturada o m_{sat} y porosidad aparente, esta serie de ensayos de laboratorio se realizó en instalaciones de la Universidad Santo Tomás en la sede Tunja, concretamente en el laboratorio de geotecnia y concretos donde se contó con los implementos y asesoría necesarios.

Materiales. Para determinar la densidad y porosidad abierta del Travertino se utilizaron los siguientes implementos de laboratorio:

Balanza digital: En este caso de la marca Pioneer referencia BJ410C con precisión de 3 decimales (Figura 14), indispensable en este procedimiento ya que con ella se deberá registrar el peso de las probetas repetidamente durante el desarrollo del procedimiento expresado en la norma UNE-EN 1936:2007, misma que además expresa que la balanza deberá tener una precisión superior a 2 cifras significativas, por lo cual se cumple la normatividad al usar la referencia mostrada en la Figura 14.

Horno: El cual se utilizará para calentar las probetas en cuestión logrando el estado seco. El horno deberá estar precalentado a 70°C y mantener dicha temperatura durante la duración del procedimiento (Figura 14).

Desecador: Necesario para reducir la temperatura de las probetas a temperatura ambiente sin que las mismas lleguen a absorber humedad lo que produciría una pérdida de precisión en los pesajes de las probetas (figura 14).

Este ensayo de laboratorio se realizó con 6 probetas de forma cubica, cuyo lado promedio mide 49,910 mm y poseen un volumen aparente de 114,53 ml cumpliendo con normatividad UNE-EN.

Figura 14

Materiales y equipos de laboratorio.



Procedimiento realizado. Una vez preparados los implementos necesarios para este ensayo se procede con la determinación de m_{sec} ,

Determinar m_{sec} . El objetivo de este ensayo de laboratorio es determinar la masa seca de la muestra de travertino. Para esto se colocan las muestras en el horno a 70°C durante 24 horas, luego de lo cual se sacan del horno y se permite que pierdan temperatura en el desecador (Figura 15), transcurrido 40 minutos se procede a pesar las muestras nuevamente comprobando que la diferencia del peso inicial y el tomado luego de 24 horas no varíe más del 1%, si es así, éste valor

será conocido como m_{sec} de la muestra correspondiente, de lo contrario se toma como peso inicial y se repite el procedimiento devolviendo las muestras al horno, en la Figura 15 se aprecia la comprobación para la muestra TM1.

Figura 15

Determinar m_{sec} para muestra TM1



Posteriormente, se precisó el volumen aparente y el volumen de poros abiertos de las muestras en cuestión, para ello se determinó la masa saturada (m_{sat}) y masa sumergida (m_{im}).

Determinar m_{sat} . Se procede a colocar las muestras completamente sumergidas en agua destilada utilizando un recipiente de fondo plano, se realizan pesajes cada 24 horas o hasta alcanzar masa constante, es decir hasta que la diferencia de las masas tomadas a 24 horas sea menor al 1% como se muestra en la Figura 16. El procedimiento para realizar los pesajes consiste en sacar la

muestra del recipiente donde permanece sumergida, luego de lo cual se retira cuidadosa y rápidamente el líquido superficial de cada muestra con ayuda de un paño, y se procede a llevar la muestra a la balanza y tomar la lectura correspondiente cuidando siempre de no realizar movimientos bruscos con la muestra, lo que provocaría una pérdida de líquido alojado en el sistema de poros de la misma.

Figura 16

Determinar m_{sat} para muestra TM1.



Seguidamente se determina la masa sumergida de cada una de las probetas (m_{im}).

Determinar m_{im} . También conocido como pesaje hidrostático o peso bajo el agua, utilizando madera de balsa, nylon, un recipiente con agua destilada y una canasta metálica con diámetro suficiente para la probeta cúbica a su lado inferior como se muestra en la Figura 17, en seguida se procede a tarar la balanza o colocarla en cero (0). El procedimiento consiste en sacar la probeta del recipiente donde se ha estado saturando y colocarla dentro de la canasta metálica

cuidando que los bordes no toquen la misma y que esté completamente sumergida, el valor indicado en la balanza corresponde m_{im} .

Figura 17

Montaje realizado para determinar m_{im}



De esta forma se ha determinado m_{sec} , m_{sat} y m_{im} . Posteriormente utilizando fórmula 1, 2, 3 y 4, provenientes de la UNE-EN 1936:2007 se obtienen los valores de bulk density o densidad aparente, densidad corregida, porosidad abierta y coeficiente de absorción de agua.

Las fórmulas aplicadas (Becerra, 2009) son las siguientes:

d_w : la densidad del agua, considerada como:

$$d_w = 1 \text{ gr/cm}^3$$

Entonces la porosidad abierta será:

$$\Phi_a = \frac{m_{sat} - m_{sec}}{m_{sat} - m_{im}}$$

Densidad esqueletal D_{skel} será:

$$D_{skel} = \frac{m_{sec}}{(m_{sec} - m_{im})}$$

Coefficiente de absorción de agua

$$\alpha a = \frac{(m_{sat} - m_{sec})}{m_{sec}} 100$$

En el anexo 3 se pueden apreciar los resultados de índices físicos con los procedimientos aquí propuestos.

5.1.3 Propiedades básicas de circulación de fluidos

Estas propiedades se determinaron a través del ensayo de absorción por capilaridad, el montaje y desarrollo del mismo cumple con lo expresado en la norma UNE-EN 1925:1999. Benavente et al (2006), evaluaron las propiedades físicas y la utilización de las rocas ornamentales. El autor afirma que estas propiedades son importantes indicadores de calidad y así mismo, contribuyen fuertemente a la durabilidad del material. Las propiedades físicas que definen la utilización del material como roca de uso ornamental son el sistema poroso, el comportamiento hídrico y las propiedades mecánicas. Teniendo en cuenta el uso del travertino como recubrimiento exterior en la plaza de Bolívar en la ciudad de Tunja, se entiende que el uso como pavimento peatonal expone el material a factores como lo son: agentes climáticos, ambientales y factores propios del uso como lo serían los diferentes agentes químicos a los que puede ser sometido el material como parte de su rutina de limpieza a lo largo de los años de servicio en un medioambiente urbano. Por lo anterior es importante conocer la velocidad y porcentaje de absorción de líquido del

Travertino de Málaga, ya que esta característica lo puede hacer en mayor o menor medida susceptible a daño por absorción de agentes ácidos, además de ser un factor que puede afectar su comportamiento mecánico acortando la vida útil del material en cuestión.

Determinar absorción por capilaridad. Para estudiar el comportamiento hídrico del Travertino se realizó el Ensayo: Determinación Del Coeficiente De Absorción Por Capilaridad normalizado por Norma EN-1925.

Material. Para el desarrollo del presente ensayo de laboratorio se utilizaron 6 probetas cubicas de aproximadamente 50 milímetros por lado, además de elementos mencionados para la determinación de los índices físicos del travertino se utilizaron los siguientes elementos para el presente ensayo de laboratorio:

- Medidor pie de rey.
- Recipiente de fondo plano.
- Papel filtro.
- Cronometro.

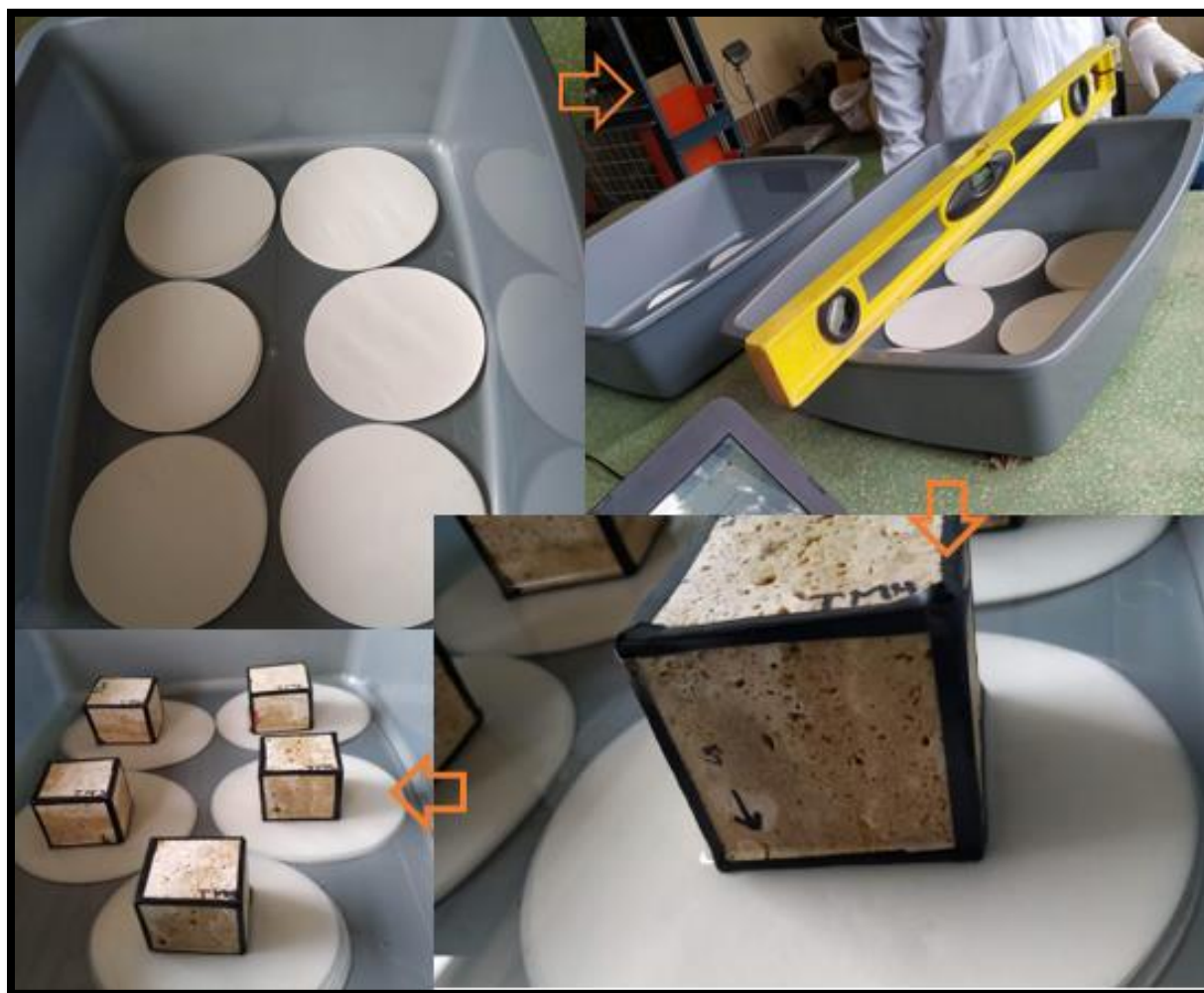
Procedimiento realizado. Utilizando un recipiente de fondo plano lo suficiente mente grande se procede a colocar cada una de las probetas sobre una capa conformada por 15 láminas apiladas de papel filtro ubicadas de forma equidistante dentro del recipiente, posteriormente se vierte agua destilada formando una lámina de agua uniforme para todas las muestras y cuidando que la misma tenga el mismo nivel de cada una de las capas de papel filtro.

El ensayo de laboratorio consiste en realizar pesajes sucesivos de cada una de las muestras registrando así la variación del peso de cada probeta producto de la absorción de agua por

capilaridad, los pesajes se realizan en intervalos definidos en la normatividad mencionada anteriormente y se realizan hasta que la muestra alcanza estado saturado.

Figura 18

Montaje para Ensayo de Laboratorio: Determinación absorción por capilaridad



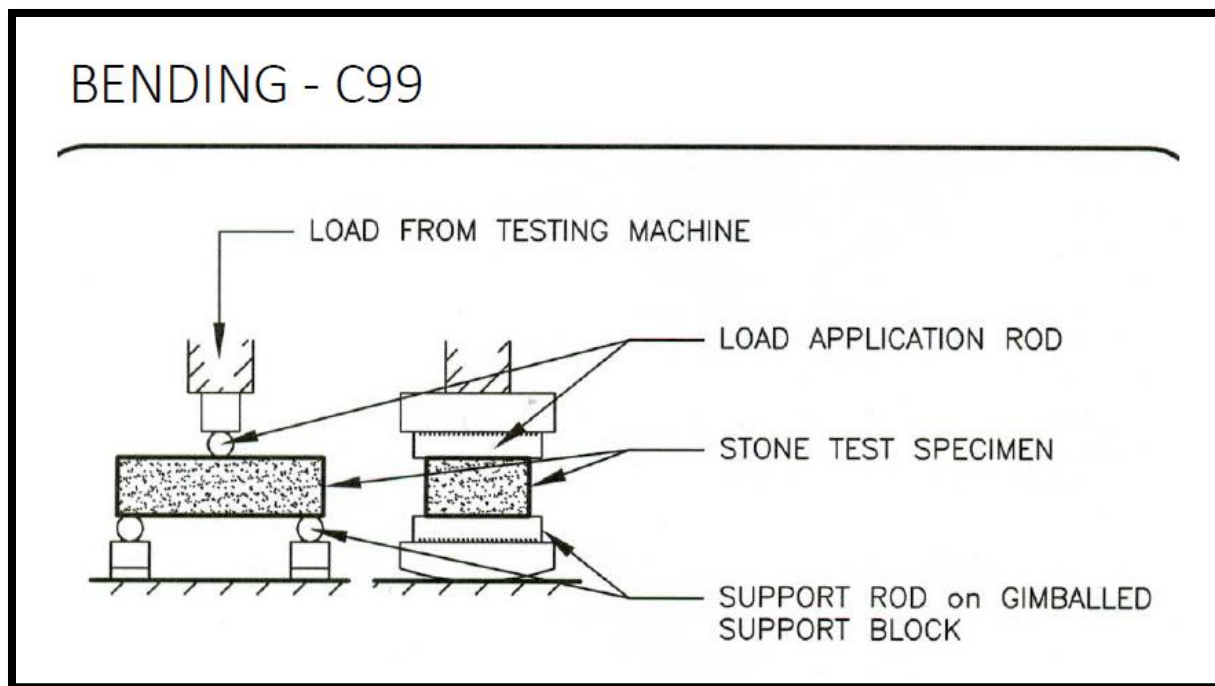
5.1.4 Caracterización mecánica

Resistencia a la flexión. En este apartado se busca conocer y comparar el comportamiento mecánico del material midiendo su resistencia a flexión, según la norma C 1527 Standard Specification for TRAVERTINE Dimension Stone, se debe realizar el ensayo C99, el cual

permitirá conocer el módulo de rotura MR del Travertino de Málaga, característica del comportamiento mecánico que es imprescindible para predimensionar o redimensionar el espesor del mismo para soportar las solicitaciones que le impone su uso como pavimento peatonal.

Figura 19

Módulo de Ruptura (MR)



Nota. Reproducida de BENDING - C99, Stone Design Seminars.

5.1.5 *Propiedades mineralógicas, químicas y texturales*

Análisis Químico y mineralógico. Se realizó análisis de XRD y XRF para muestras de roca. En el ensayo de difracción de rayos X se usó Difractómetro Phillips X'pert Pro Panalytical mientras que el ensayo de fluorescencia de rayos X (FRX) se realizó en el equipo PANALYTICAL Minipal 2 PW4025 con fuente de Rodio (Rh), empleando 20.0 kV y 5 μ A durante 240 segundos.

Debido a que el equipo no posee curvas de calibración para este tipo de material, la medición fue realizada bajo el programa pre establecido por el fabricante conocido como "Standardless".

6 Resultados y Análisis

6.1 Resultado y Análisis Densidad Aparente, Porosidad Abierta.

La densidad aparente es una característica de gran importancia en la piedra natural ya que permite conocer el peso de la estructura de cubierta en el caso de un pavimento peatonal, permitiendo así un diseño más preciso de la estructura de soporte, adicionalmente se conocerá también el peso por unidad de piedra, información útil en la logística de su transporte e instalación.

La densidad aparente de una roca depende de la densidad de sus minerales constituyentes y de su porosidad. Las rocas compactas, es decir con baja porosidad empleadas como piedra natural en construcción, alcanzan valores de densidad aparente entre 2500 y 3100 kg/m³. Las menores densidades se dan en rocas muy porosas, y alcanzan valores por debajo de 2000 kg/m³. Por lo general, las rocas más compactas, más densas, suelen tener una mayor resistencia mecánica a la compresión y un mejor comportamiento frente a heladas y sales, aunque no necesariamente una mayor resistencia a la flexión. (Becerra, 2009; Rocha *et. al* 2019; Freire *et. Al*, 2021)

A nivel internacional no existen valores restrictivos referentes a la densidad aparente de una roca y el uso de la misma como pavimento peatonal o piedra ornamental; sin embargo, las normas ASTM ofrecen unos valores mínimos que se deben tener en cuenta a título informativo más que restrictivo (Tabla 7). Los resultados de densidad promedio del travertino de Málaga (Tabla 8), de valor 2737.043 Kg/m³, al ser comparados con los valores especificados por ASTM (Tabla 7), permiten afirmar que el travertino de Málaga es una roca medianamente compacta, de baja porosidad y buena densidad; adicionalmente que cumple con los valores mínimos recomendados por ASTM.

Tabla 7

Especificaciones para la densidad aparente en las normas ASTM.

Tipo de Roca	ρ (kg/m ³)
Mármol calcítico (ASTM C503)	2595
Mármol dolomítico (ASTM C503)	2800
Caliza densa (ASTM C568)	2560
Caliza densidad media (ASTM C568)	2160
Caliza baja densidad (ASTM C568)	1760
Granito (ASTM C615)	2560
Cuarcita (ASTM C616)	2560
Arenisca cuarcítica (ASTM C616)	2400
Serpentina (ASTM C1526)	2560
Travertino (ASTM C1527)	2305

Nota. Reproducida de ASTM C1527-11/C1527M-11 Standard specification for travertine dimension stone.

Tabla 8

Densidad Aparente, Porosidad Abierta Y Coeficiente De Absorción De Agua, Resultado Final, Travertino de Málaga. UNE-EN 1936:2007.

	Promedio	Máximo
Densidad Aparente (kg/m ³)	2737.043	2978.357
Densidad corregida o del esqueleto dskel (gr/cm ³)	2942.155	3207.727
Porosidad abierta (%)	6.971%	8.378
Coeficiente de absorción de agua	2.55	3.19

La roca travertino se caracteriza por su anisotropía, esto es, la variabilidad de las propiedades del material según el sentido en el que se está analizando; en este caso, representada por las láminas de carbonatos con distintos grados de porosidad y orientación. Con relación a la densidad, se presenta dispersión de resultados del 11.81% si se considera los valores de densidad mínima y máxima y hasta el 2.6% en densidad aparente (Tabla 9). Índices físicos por muestra se encuentran en el anexo 2.

Tabla 9

Densidad Aparente, Porosidad Abierta y Coeficiente de Absorción De Agua, Por Muestra, Travertino de Málaga. UNE-EN 1936:2007.

Probeta	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
Bulk density (kg/m ³)	2657.150	2727.926	2626.504	2706.260	2726.065	2978.357
Densidad corregida o del esqueleto d _{skel}	2.870	2.908	2.867	2.908	2.891	3.208
Porosidad abierta (%)	7.432%	6.205%	8.378%	6.949%	5.715%	7.151%
Coeficiente de absorción de agua	2.797%	2.274%	3.190%	2.568%	2.097%	2.401%

6.2 Resultados y análisis de absorción por capilaridad

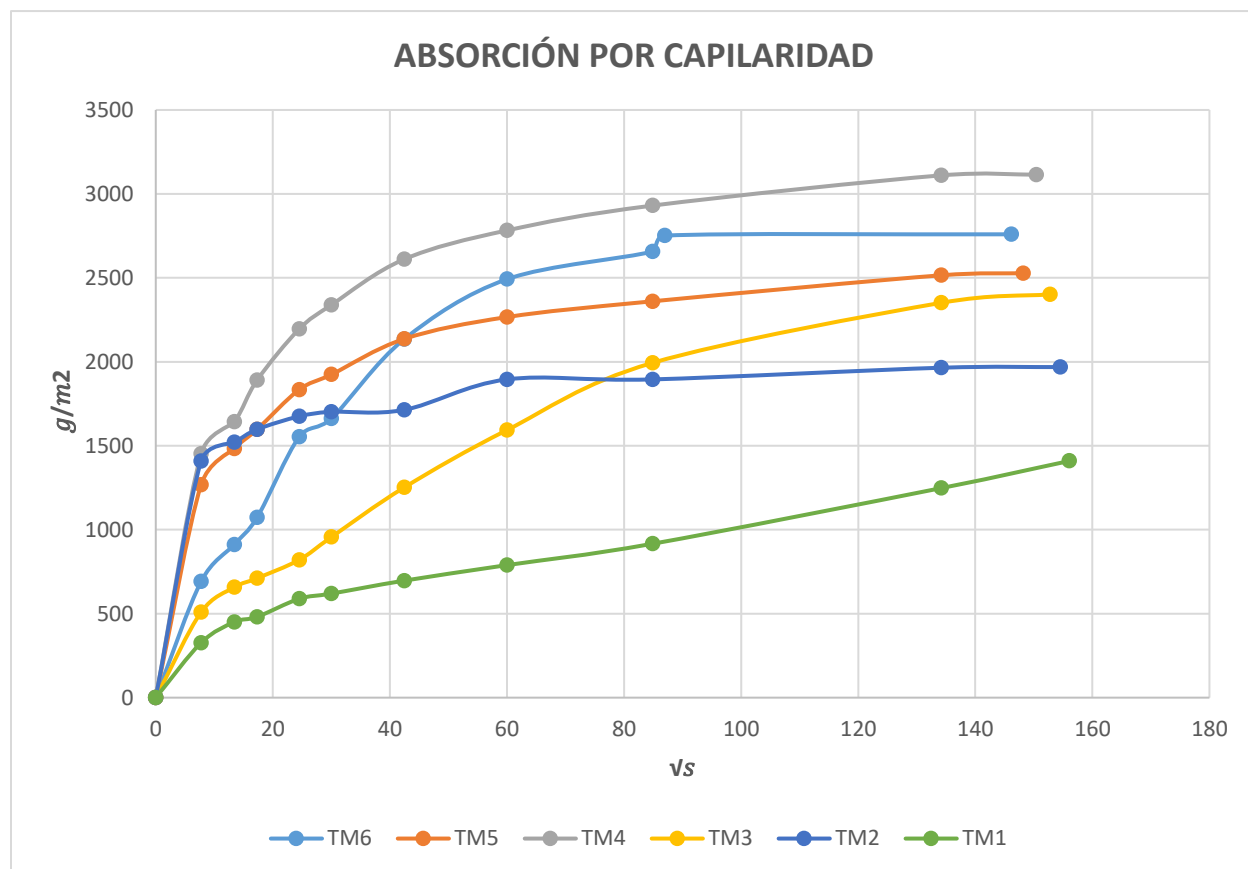
La absorción de agua por capilaridad es una característica de declaración voluntaria en placas y baldosas de piedra natural para revestimientos y pavimentos tanto exteriores como interiores (UNE-EN 1469, UNE-EN 12057 y UNE-EN 12058). De la tabla 10 y la figura 20 se puede destacar la gran anisotropía del material, se aprecia como el coeficiente de absorción por capilaridad puede variar hasta en un 52% entre la muestra TM1 y la muestra TM4. En la figura 20 se aprecia además la desigualdad en velocidad de absorción por capilaridad, exhibiendo comportamientos con diferencias muy marcadas en cuanto a las velocidades y capacidad de absorción máxima de cada probeta, lo anterior denota un complicado y variante sistema poroso en el Travertino de Málaga posiblemente ocasionado desde su génesis. Gráfica y tablas muestra por muestra y determinación del coeficiente de absorción por capilaridad se encuentran en el anexo 4.

Tabla 10

Coeficiente De Absorción De Agua por capilaridad, Resultado Final, Travertino de Málaga.

UNE-EN 1925:1999.

Probeta	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
A(m ²)	0.002595	0.002588	0.002572	0.002502	0.002453	0.002544
Coeficiente absorción de agua por capilaridad $g/m^2 \times \sqrt{s}$	1625.433	1968.701	2401.870	3114.308	2527.517	2759.434
Coeficiente absorción por capilaridad promedio total. $g/m^2 \times s^{0.5}$						2399.54421

Figura 20*Absorción por capilaridad*

El gráfico muestra la heterogeneidad del travertino, mientras la muestra TM5 presenta un alto coeficiente de absorción por capilaridad ($3114.308 \text{ g/m}^2 \times s^{0.5}$) la muestra TM1 muestra una baja absorción por capilaridad ($1625.433 \text{ g/m}^2 \times s^{0.5}$), lo que indicaría que las muestras presentan una estructura de poros muy distinta, por lo que se deberían realizar ensayos de laboratorio mucho más avanzados.

6.3 Resultados y Análisis de Resistencia a la Flexión

Este ensayo de laboratorio fue realizado a partir de 3 placas de Travertino de Málaga cuyas medidas corresponden a: 200mm de largo, 100mm de ancho y 30mm de espesor, las baldosas en cuestión fueron falladas en el laboratorio de geotecnia de la empresa López Hermanos Geotecnia y Aguas Subterráneas S.A.S buscando mayor fiabilidad en tan importante ensayo de laboratorio.

6.3.1 *Relación de características mecánicas con criterio de espesor.*

Según normatividad europea UNE-EN 1341 Anexo A, el valor mínimo a flexión que deberá cumplir el material será el valor que satisface la carga de rotura especificada para las condiciones de uso previstas en la normatividad antes mencionada, a continuación, se realiza revisión según anexo A de la UNE-EN 1341 para obtener la carga a flexión mínima con la que debería cumplir el Travertino de Málaga:

$t = 30 \text{ mm}$ (espesor de baldosa usada en la plaza de Bolívar Tunja)

$L = 760 \text{ mm}$ (longitud de baldosa usada en la plaza de Bolívar Tunja)

$W = 420 \text{ mm}$ (ancho de baldosa usada en la plaza de Bolívar Tunja)

$F = 3500\text{N}$ (de **Tabla 2**)

$S = 1,8$ (de **Tabla 3**)

Si aplicamos la *ecuación 1* tendremos:

$$R = \frac{3 \times F \times L \times S}{2 \times W \times t^2}$$

$$R = \frac{3 \times 3500N \times 760mm \times 1,8}{2 \times 420mm \times (30mm)^2}$$

$$R = 19 MPa$$

Se obtiene una resistencia a la flexión **$R = 19 MPa$** que podrá compararse con el valor mínimo esperado **E_R** declarado por el suministrador. Ya que la normatividad colombiana no exige al suministrador publicar el valor **E_R** , por lo tanto, es un valor no conocido oficialmente, se ha tomado del estudio realizado durante este proyecto y el cual está plasmado en la **Tabla 11**, **$E_R = 8,96 MPa$** .

Tabla 11

Módulo de rotura ASTM C99 (equivalente a la resistencia a la flexión bajo carga concentrada)
en las normas ASTM

Probeta	TM7	TM8	TM9
Largo mm	201	200,9	200
Ancho real (ar) mm	100	100	100
Espesor real (er) mm	30,5	30,4	30,3
Carga máxima (C_{max}) KN	2,77	2,97	9,67
Módulo de rotura (M_r) MPa	8,96	9,67	9,38

Promedio	9,34
Valor inferior esperado (E_R) Mpa	8,96

Así entonces, el módulo de rotura MR como resultado del ensayo C 1527 Standard Specification for TRAVERTINE Dimension Stone: C99 del travertino de Málaga, se encuentra 10,04 MPa por debajo de lo que sería el mínimo permitido por la normatividad europea bajo la cual se realiza el anterior análisis. De la *ecuación 1* usada anteriormente se deduce, que se pueden modificar las medidas largo (L) y ancho (W) o espesor (t) necesitando así menor Mr para cumplir la solicitud del caso.

Espesor mínimo de rotura. Ya con las dimensiones en planta de la baldosa o placa a emplear y teniendo un valor de resistencia a flexión de partida, podemos determinar el espesor mínimo (t). El método de cálculo se describe en la norma UNE-EN 1341 Anexo A, la misma norma aclara que es una ecuación de aproximación a la realidad y no debe usarse en placas de grandes formatos con grandes cargas a flexión.

Ecuación 2.

$$t = \sqrt{\frac{3 \times F \times L \times S}{2 \times W \times E_R}}$$

Donde;

t espesor de la baldosa, en mm

L longitud de la baldosa, en mm

W ancho de la baldosa, en mm

F carga de rotura, en N (**Tabla 2**)

S factor de seguridad (**Tabla 3**)

Para nuestro caso de estudio tendremos:

$$t = \sqrt{\frac{3 \times 3500N \times 760mm \times 1.8}{2 \times 420mm \times 8.96MPa}}$$

$$t = 43.68mm$$

De la *ecuación 2* tendremos entonces que, para las dimensiones de losa empleadas en la plaza de Bolívar de Tunja, teóricamente se debería usar:

$$t \cong 45mm$$

Este valor obtenido según normatividad **UNE-EN 1341 Anexo A** puede variar según las dimensiones y lugar de uso dentro del mismo proyecto, además de las condiciones y solicitaciones propias del lugar se debería proveer de dimensionamiento y espesores para escaleras lugares estrechos y por supuesto fachadas, en donde se tendría que tener en cuenta fuerzas horizontales F_v y acción sísmica F_s .

Ya definido (t) aplicando a la *ecuación 1* se tendría:

$$R = \frac{3 \times 3500N \times 760mm \times 1,8}{2 \times 420mm \times (45mm)^2}$$

$$R = 8.44 MPa$$

De esta forma se obtendría una resistencia a la flexión $R = 8,44 \text{ MPa}$ inferior a $E_R = 8,96 \text{ MPa}$ cumpliendo así con la normatividad del mercado común europeo y asegurando un uso responsable del Travertino de Málaga.

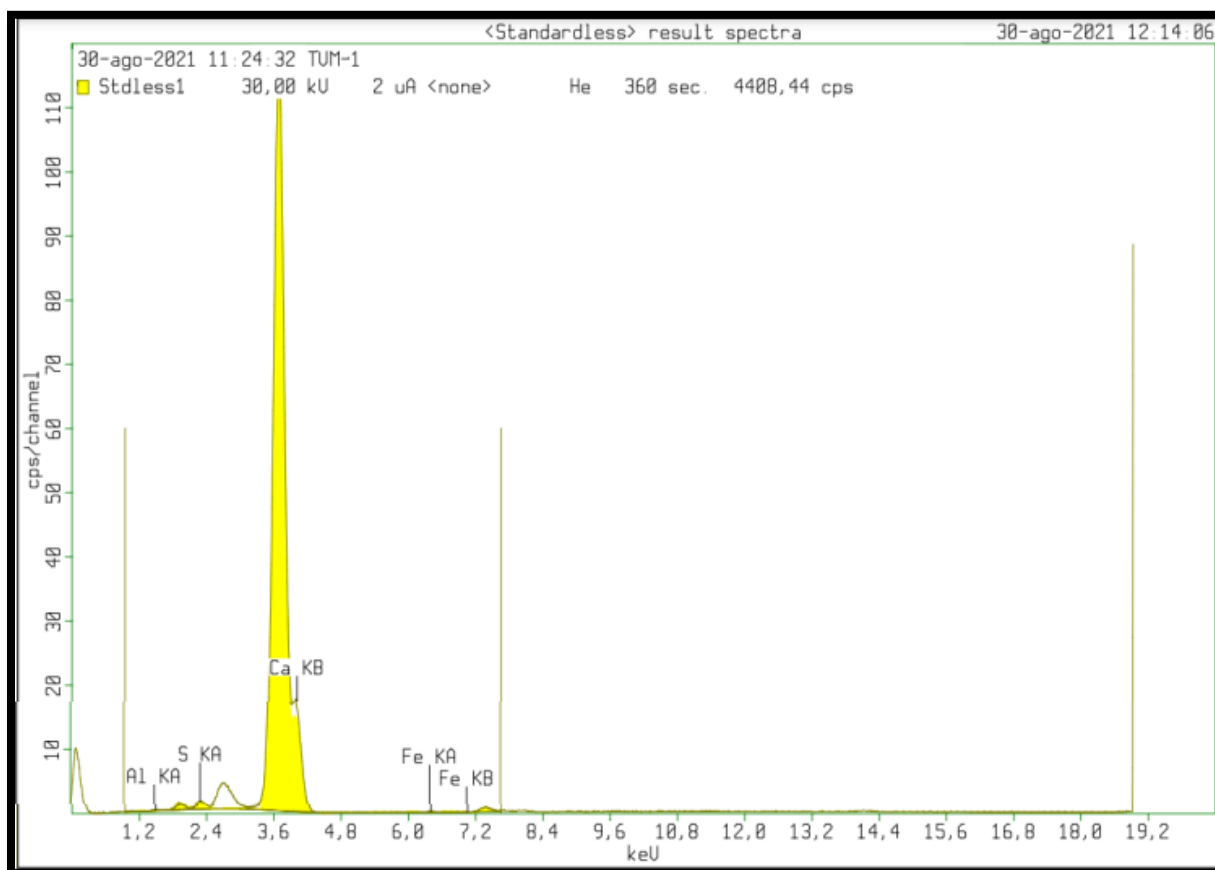
6.4 Resultados Análisis Químico y Mineralógico

Como se aprecia en la Figura 21, los resultados de análisis químico a partir de la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX), indican que los elementos predominantes en la muestra “TVM 1” son: Calcio 98,5%, aluminio 0,80%, hierro 0,092% y azufre 0,63%.

El análisis mineralógico por difracción de rayos X (DRX), muestra que el Travertino está constituido por carbonato de calcio (CaCO_3) en forma de calcita, con trazas de óxido de silicio, oxihidroxido de aluminio y carbonato de hierro (Figura 22).

Figura 21

Resultados fluorescencia de rayos X (FRX)

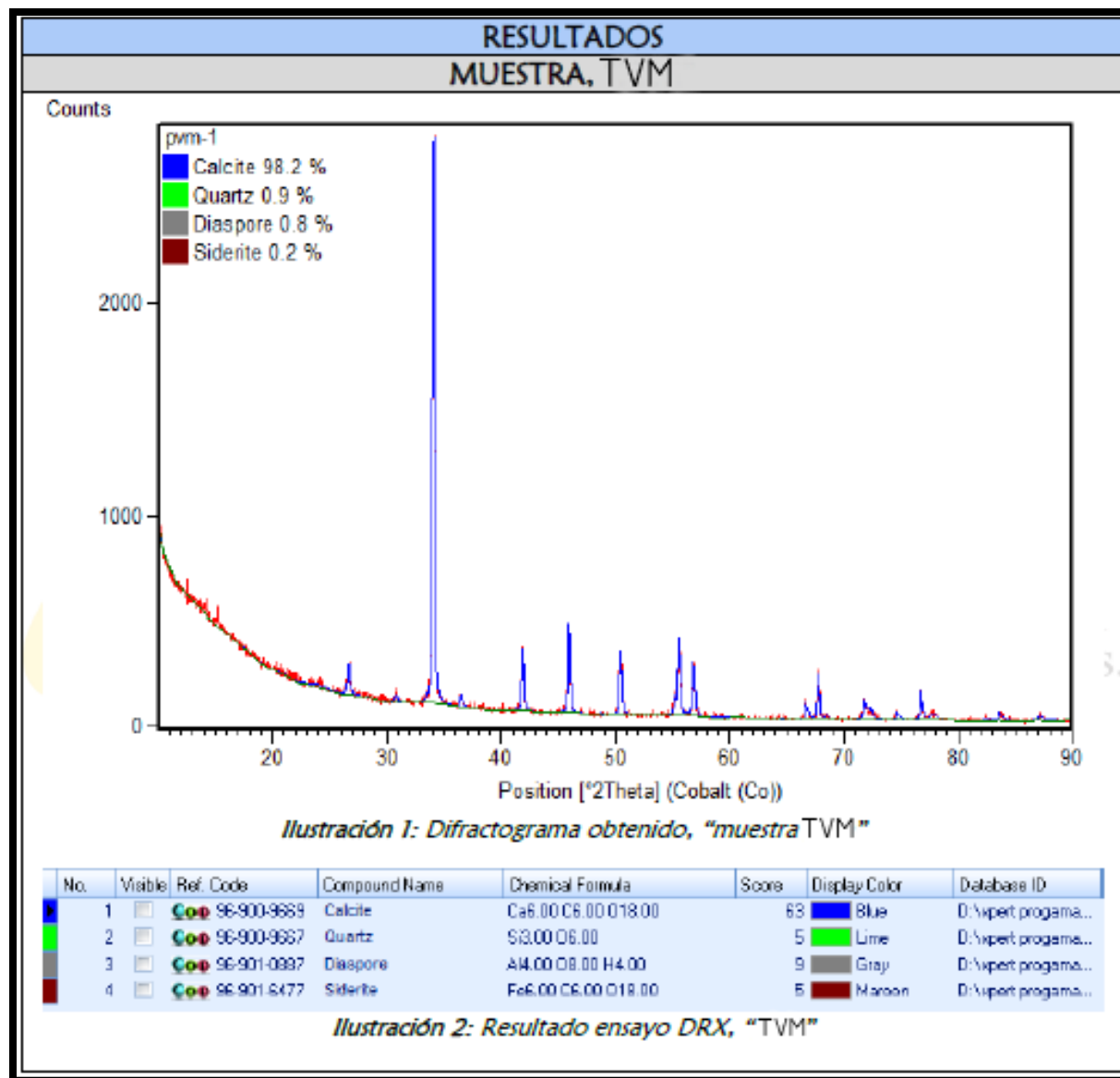


Nota. Ca: Calcio, Al: aluminio, Fe: hierro, Si: silicio, S: azufre.

Nota. Reproducido de FLUORESCENCIA DE RAYOS X Travertino de Málaga, 2021, INCITEMA – Caracterización de Materiales.

Figura 22

Difractograma obtenido, muestra TVM



Nota. Reproducido de Difracción de rayos X Travertino de Málaga, 2021, INCITEMA-
Caracterización de Materiales.

Determinando la relación existente entre las propiedades mecánicas, físicas y químicas con respecto a la susceptibilidad al deterioro se encuentra que; el travertino está conformado por calcita en un 98.2%, es una roca altamente porosa ya que la porosidad abierta llega hasta el 8.37%, con una densidad promedio de 2737 Kg/m^3 y un coeficiente de absorción de agua por capilaridad que llega hasta los $3114.308 \text{ g/m}^2 \times \text{s}^{0.5}$, al ser una roca calcárea con alta porosidad y absorción de agua, posibilita la rápida saturación del travertino, que al estar en un medio contaminado provoca la meteorización química desde el interior y el exterior. El proceso de disolución que se lleva a cabo en rocas calcíticas cuando estas se encuentran en ambientes contaminados (smog, excremento de paloma, entre otros) afecta fuertemente el comportamiento mecánico de la roca, dando como resultado un deterioro acelerado y menor resistencia mecánica, lo que provoca fisuración.

7 Conclusiones

Dado el uso del Travertino como pavimento peatonal se prevén grandes solicitaciones para este material principalmente a flexión, debido a la forma plana de las placas de travertino que conlleva a un funcionamiento principalmente a flexión desde el punto de vista mecánico. Además de la gran circulación peatonal en la plaza de Bolívar (Tunja), esta es usada con frecuencia en eventos muy concurridos que provocan cargas elevadas al travertino de Málaga que conforma el pavimento ornamental.

El coeficiente de absorción por capilaridad del travertino colocado en la plaza de Bolívar (Tunja) es en promedio $2399.54 \text{ g/m}^2 \times \text{s}^{0.5}$; su porosidad abierta varía del 5.7% al 8.3% y su densidad promedio es de 2737 kg/m^3 . Por lo anterior, se prevé la existencia de diferentes planos

de debilidad a lo largo y ancho de las losas de travertino, que, al estar sometidas a cargas variables a flexión, podrían simplemente fallar ante las solicitaciones provocadas por el tráfico peatonal.

El travertino de Málaga está conformado por 98.5% de calcio, con calcita como mineral fundamental, lo cual lo hace especialmente susceptible a deterioro y procesos de meteorización química, en este caso acelerados por la gran rapidez con la que se da el fenómeno de absorción por capilaridad y el ambiente especialmente lluvioso con presencia de smog y demás contaminantes presentes en el ambiente urbano.

Con respecto a la durabilidad del material, hay factores de riesgo como su alto y variable coeficiente de absorción por capilaridad, el ambiente urbano lluvioso y de alta humedad, que se podrían encargar de llevar al interior de la roca diferentes componentes con cierto grado de acidez presentes en cualquier ambiente urbano, y que a su vez podrían ocasionar procesos de meteorización química.

Un factor de riesgo muy importante para el travertino usado en la Plaza de Bolívar de Tunja, es el dimensionado de las losas, ya que no cumplen con las solicitaciones a las que están sometidas. Según la norma UNE-EN 1341 Anexo A, para las dimensiones de las losas en la plaza de Bolívar ($L=760\text{mm}$ y $W=420\text{mm}$), el espesor (t) mínimo, debería ser de 45mm , presentando una diferencia considerable con el espesor usado de $t=30\text{mm}$. Por lo anterior, es de esperarse que se presente excesiva fisuración, debido a que se está sobrepasando la capacidad a flexión del material.

7.1 Recomendaciones

El Travertino de Málaga es de una belleza natural resaltable, que, por sus características físicas, químicas y mecánicas, con el dimensionamiento y los cuidados adecuados se podría usar en una amplia gama de productos. Se recomienda realizar una caracterización más avanzada enfocada en el uso específico que se le piense dar, con énfasis en el análisis de la estructura porosa de la roca.

Dada la inexistencia de normatividad colombiana con respecto a la piedra natural en usos comerciales, es completamente recomendable seguir normatividad europea (UNE EN) o brasileña (NBR), que se han elaborado a partir de investigaciones científicas y han demostrado su eficacia fomentando la producción de productos en piedra natural que genera empleos y valor agregado a la comunidad productora, al tiempo que protegen al consumidor de dichos productos en piedra natural asegurándole estándares de calidad.

Aunque se desconoce la subestructura del pavimento peatonal usado en la plaza de Bolívar en la ciudad de Tunja, y dado el comportamiento en cuanto a la dinámica de circulación de fluidos y comportamiento mecánico a flexión del travertino, se recomienda; usar una subestructura para el uso del travertino con una base estructural y de apoyo mucho más robustas (figura 1), se debe asegurar la completa impermeabilización de la subestructura con relación al subsuelo del pavimento peatonal.

8 Glosario

Acuífero: Roca o sedimento a través del cual el agua subterránea se mueve con facilidad.

Anisotropía: características diferentes de la roca, las propiedades físicas varían de acuerdo al sentido en el que se miden en la roca.

Anticlinal: Pliegue de estratos.

Cantera: Excavación en la superficie de la tierra para la explotación de minerales o de materiales de construcción.

Calcita: es un mineral formado por carbonato de calcio, su color varía de blanco a caramelo y su fórmula química es CaCO_3 .

Carbonato de hierro: su fórmula química es FeCO_3 , es un carbonato de hierro (II) del grupo de la calcita, su color varía de pardo a amarillento verdusco, también conocido como siderita.

Capilaridad: propiedad de los fluidos que, dependiendo de la tensión superficial y cohesión, le confiere la capacidad de subir o bajar por un tubo capilar.

Densidad: Masa por unidad de volumen de un material concreto.

Diaclasa: Fractura en la roca a lo largo de la cual no ha habido movimiento.

Dirección: Rumbo, determinado con una brújula, de la línea de intersección entre un estrato o una falla que buza y una superficie horizontal.

Dureza: Resistencia de un mineral a la abrasión y el rayado.

Esfuerzo: Fuerza por unidad de área sobre la que se aplica dicha fuerza. Los esfuerzos pueden ser normales, cortantes o torsionales. En algunos medios se prefiere utilizar el término tensión para este concepto.

Estratos: Capas paralelas de rocas sedimentarias.

Facies: Porción de una unidad litológica que posee un conjunto distintivo de características que la distingue de otras partes de la misma unidad.

Factor de seguridad: el esfuerzo admisible o de trabajo.

Falla: Plano de rotura en una masa rocosa a lo largo de la cual se produce movimiento.

Fisura: Grieta en la roca a lo largo de la cual hay una separación evidente.

Fractura: Cualquier rotura longitudinal de la roca sin que haya habido movimiento apreciable.

Fuerza: Lo que tiende a poner a los objetos estacionarios en movimiento o a cambiar los movimientos de los cuerpos en movimiento.

Fluorescencia: Absorción de la luz ultravioleta, que es reemitida como luz visible.

Foliación: Término para designar el ordenamiento linear de las características texturales de una roca.

Interpartícula: Porosidad primaria, selectiva de fábrica, que queda entre las partículas en el momento de la sedimentación. Choquette y Pray (1970).

Meteorización: Desintegración y descomposición de una roca en la superficie terrestre o en un lugar próximo a ella.

Meteorización química: Procesos mediante los cuales la estructura interna de un mineral es alterada por eliminación y/o adición de elementos

Mineral: Material cristalino inorgánico de origen natural con una estructura química definida.

Oxihidroxido de aluminio: conocido también como boehmita, es un mineral de color blanco a rojizo, su fórmula química es $\text{AlO}(\text{OH})$.

Permeabilidad: Medida de la capacidad de un material para transmitir agua.

Porosidad: Volumen de espacios abiertos en la roca o el suelo.

porosidad aparente: Volumen de los poros permeables dividido por el volumen total.

Recursos minerales: Todos los depósitos descubiertos y no descubiertos de un mineral útil que puedan ser extraídos ahora o en algún momento del futuro.

Roca: Mezcla consolidada de minerales.

Roca sedimentaria química: Roca sedimentaria que consiste en material precipitado del agua por medios orgánicos o inorgánicos.

Sinclinal: Pliegue con disposición cóncava de los estratos sedimentarios; o encontrándose las rocas más modernas en el centro.

Travertino: roca sedimentaria química, tipo de caliza encontrado normalmente en cuevas.

Textura: El tamaño, la forma y la distribución de las partículas que colectivamente constituyen una roca.

9 Referencias Bibliográficas

Anselmo, A. (2017) Génesis de travertinos en Baños Colina y Baños Morales, Cajón del Maipo, Región Metropolitana. Memoria para optar al título de geólogo, Universidad de Chile, Departamento de geología.

ASTM C1527-11/C1527M-11 Standard specification for travertine dimension stone.

ASTM C503/C503M-10 Standard specification for marble dimension stone

ASTM C99/C99M-09 Standard test method for modulus of rupture of dimension stone.

Barbosa Troncoso, C. (2018). Mineralogía y geoquímica de travertinos andinos: Caso de estudio Baños Azules, Cajón del Maipo, Chile. Recuperado de: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170031>

Becerra, J. (2009). Avaliação da susceptibilidade aos processos de deterioração dos calcários ornamentais da Formação La Tampa usados na construção civil de Medellín – Colômbia. (Tesis doctoral, Universidad Federal de Minas Gerais). Recuperado de: <http://hdl.handle.net/1843/MPBB-7TXMCL>

Becerra, J. E. & Pulido, O. (2019). Rocas ornamentales. En: Recursos minerales de Colombia, vol. 1. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Benavente, D. (2006) Propiedades físicas y utilización de rocas ornamentales. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 106-112.

Benavente, D. (2009). Influencia de la petrografía en las propiedades petrofísicas y de durabilidad del Travertino Clásico. Valoración de su anisotropía. GEOGACETA. 147-50.

Recuperado

de:

https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/25579/1/2009_Benavente_et al_Geogaceta.pdf

Bernabéu, Ana. (2005). Utilización de rocas como pavimentos.

Buitrago Cárdenas, G. A., & Becerra Becerra, J. E. (2020). Travertinos de la cantera San Antonio, municipio de Villa de Leyva - Colombia. Avances en caracterización física y mineralógica para su uso como roca ornamental. *L'esprit Ingénieux*, 9(1), 10-28. Recuperado de <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieux/article/view/1841>

Buitrago, A., Becerra, J. (2020). Travertinos de la Cantera San Antonio, municipio de Villa de Leyva – Colombia. Avances en la caracterización física y mineralógica para su uso como roca ornamental. *L'esprit Ingeniux*, Vol.9, 10-28.

Freire- Lista, David M., Becerra Becerra, J.E., Simões de Abreu Mila, The historical quarry of pena (Vila Real, north of Portugal): Associated cultural heritage and reuse as a geotourism resource, *Resources Policy*, Volume 75, 2022, 102528, ISSN 0301-4207, <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102528>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420721005353>)

Díaz Rodríguez, M., Forero Torres, K. (2018). Caracterización mineralógica y mecánica de rocas areniscas usadas en Tunja desde la colonia hasta la actualidad.

Esquivel, S.M. (2013). Avances y especificaciones para pavimentos en piedra. Universidad de los Andes.

García del Cura, M.A., Benavente, D., Martínez Martínez, J. & Ordoñez Delgado, S., (2017). Instituto Geológico y Minero de España, 128(2), 467-483. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10045/68407>

García del Cura, M.A., Benavente, D., Martínez Martínez, J. & Ordoñez Delgado, S. (2014). Travertinos de baño de Mula (Murcia). Una roca de interés sedimentológico y arqueológico. Sociedad Geológica de España.2014, 56: 75-78. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10045/43223>

Jonathan Patiño y Marco Suárez (2015). INVESTIGACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ROCAS ORNAMENTALES EN LA FORMACIÓN DE LOS INGENIEROS CIVILES. Universidad Santo Tomás.

Molina, A. (2017). *GUÍA TÉCNICA DE LA PIEDRA NATURAL*. Requisitos y control de recepción. Clúster de la Piedra Natural.

Morales Tassinari, A.M., Azcaray Rivera, M.M., Ordóñez, M.V., Servín Martínez, A. & Hernández Zárate, J.A. (2019). “caracterización físico-mecánica de dos travertinos en la región de Tepexi de Rodríguez, puebla, México”. Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez, Puebla, México. Recuperado de http://somim.org.mx/memorias/memorias2019/articulos/A2_14.pdf

Muehlbauer, Charles. (2019). ASTM STANDARDS Understanding Stone Testing.

Pentecost, A. (2005). Travertine. Springer Science & Business Media.

Pentecost, A., & Viles, H. (1994). A review and reassessment of travertine classification. *Géographie physique et Quaternaire*, 48(3), 305-314.

Peñalver, E., Badía Jimeno, S.J., Muñoz Bertumeo, J. & Ruiz Gonzalez, M.X. (2002). Interés Patrimonial de los travertinos del río Matarraña, Beceite; un yacimiento paleobotánico a proteger, Teruel, (2002), PP. 305-324.

Prieto R., G., Guatame, C. L. y Cárdenas, S. C. (2019). Recursos minerales de Colombia, vol 1. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Quade, J., Rasbury, E. T., Huntington, K. W., Hudson, A. M., Vonhof, H., Anchukaitis, K., Betancourt, J., Latorre, C. & Pepper, M. (2017). Isotopic characterization of late Neogene travertine deposits at Barrancas Blancas in the eastern Atacama Desert, Chile. *Chemical Geology*, 466, 41-56.

Rocha Vargas, D., Becerra Becerra, J., Benavente, D., Cañaveras, J., Costa, A. (2019). 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.

UNE 22202-1:2011 Productos de piedra natural. Construcción de pavimentos con piedra natural. Parte 1: Baldosas para pavimentación de suelos y escaleras.

UNE 22202-2:2011 Productos de piedra natural. Construcción de pavimentos con piedra natural. Parte 2: Adoquines para pavimentación.

UNE-EN 12372:2007 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la flexión bajo carga concentrada.

UNE-EN 1341:2013 Baldosas de piedra natural para uso como pavimento exterior. Requisitos y métodos de ensayo.

UNE-EN 1342:2013 Adoquines de piedra natural para uso como pavimento exterior.
Requisitos y métodos de ensayo.

UNE-EN 1343:2013 Bordillos de piedra natural para uso como pavimento exterior.
Requisitos y métodos de ensayo.

UNE-EN 1936:2007 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.

Urriola Rodríguez, M. (2020.). Evaluación mineralógica, física y mecánica de las rocas serpentinitas de Ituango, NE de Colombia, para su uso como roca ornamental. Universidad EIA.

Valero-Garcés, B., Arenas, C., & Delgado-Huertas, A. (2001). Depositional environments of Quaternary lacustrine travertines and stromatolites from high altitude Andean lakes, northwestern Argentina. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 38(8), 1263-1283.

Vargas, R., Arias, A., Jaramillo, L., Téllez, N. (1984). Geología de la plancha 136 Málaga. INGEOMINAS, versión digital 2009.

10 Apéndices y Anexos

Anexo 1. Comprobación geométrica muestras, Travertino de Málaga.

Muestra TM1

EVIDENCIA FOTOGRAFICA	muestra TM1			
		d1	d2	área(cm)
	l1	5.02	5.15	25.95
		5.03	5.18	
	Prom	5.025	5.165	
	l2	4.96	4.97	24.75
		4.96	5.01	
		4.96	4.99	
	l3	4.94	5.1	25.19
		4.94	5.1	
		4.94	5.1	
	l4	4.96	5.02	25.10
		5.01	5.05	
		4.985	5.035	
	l5	4.96	5.1	25.40
		4.96	5.14	
		4.96	5.12	
	l6	4.95	5.19	25.47
		4.94	5.11	
	4.945	5.15		

COMPROBACIÓN	
Volumen aparente (ml)	
127.36	
superficie	
151.88	
S/Vap	1.19
6/d	1.19
CUMPLE	

Muestra TM2

EVIDENCIA FOTOGRAFICA	muestra TM2			
		d1	d2	área(cm)
	l1	4.94	5.05	24.82
		4.97	4.97	
	Prom	4.955	5.01	
	l2	4.96	5.18	25.42
		4.97	5.06	
		4.965	5.12	
	L3	4.97	5	25.88
		5.11	5.27	
		5.04	5.135	
	L4	4.95	5.27	25.39
		4.96	4.98	
		4.955	5.125	
	L5	5	4.97	24.58
		4.9	4.96	
		4.95	4.965	
	L6	4.97	4.95	24.45
		4.88	4.98	
	4.925	4.965		

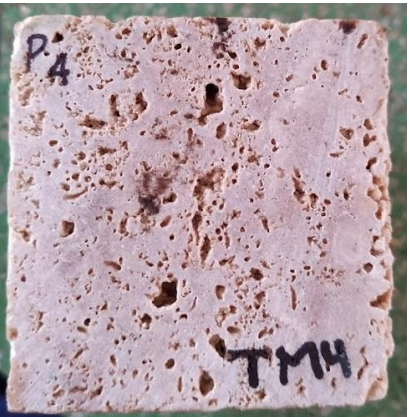
COMPROBACIÓN	
Volumen aparente (ml)	
125.69	
superficie	
150.55	
S/Vap	1.20
6/d	1.20
CUMPLE	

Muestra TM3

EVIDENCIA FOTOGRAFICA	muestra TM3			
		d1	d2	área(cm)
	l1	5.24	5.07	25.73
		4.87	5.11	
	Prom	5.055	5.09	
	l2	4.81	4.98	24.57
		4.92	5.12	
		4.865	5.05	
	l3	4.88	4.97	24.40
		4.94	4.97	
		4.91	4.97	
	l4	4.95	5.07	24.95
		4.96	5	
		4.955	5.035	
	l5	4.92	4.85	24.01
		4.94	4.89	
		4.93	4.87	
	l6	4.91	4.94	24.18
		4.94	4.88	
	4.925	4.91		

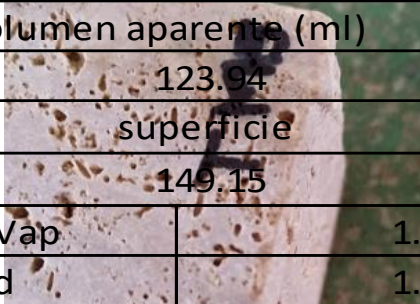
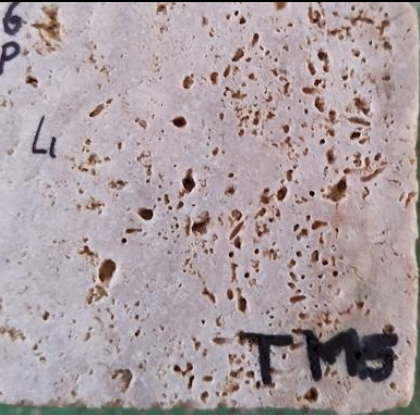
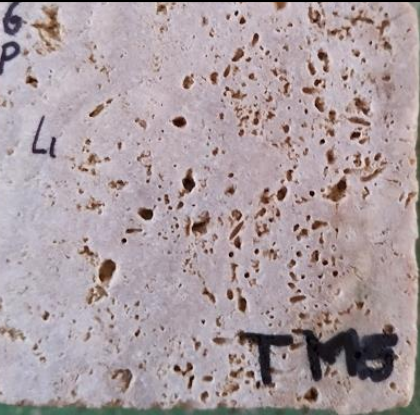
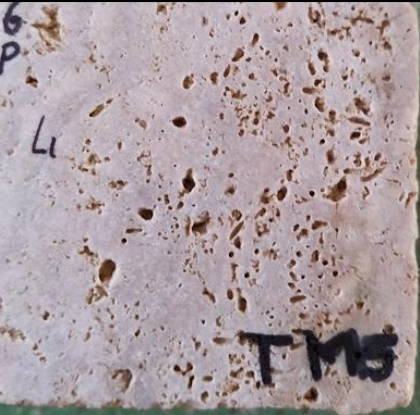
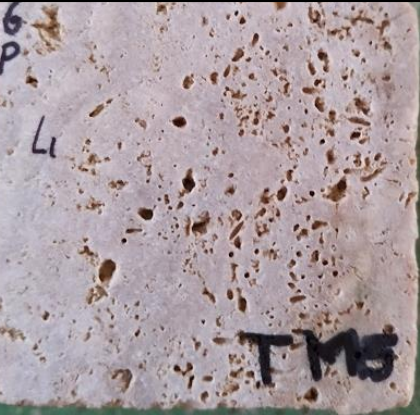
COMPROBACIÓN	
Volumen aparente (ml)	
122.30	
superficie	
147.83	
S/Vap	1.21
6/d	1.21
CUMPLE	

Muestra TM4

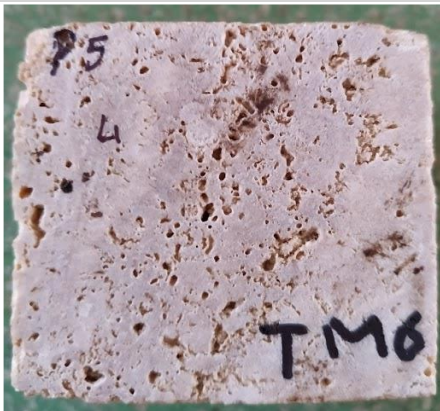
EVIDENCIA FOTOGRAFICA	muestra TM4		
	d1	d2	área(cm)
	l1	4.94	5.05
		4.95	5.07
	Prom	4.945	5.06
	l2	4.9	5.15
		4.89	5.05
		4.895	5.1
	L3	4.9	5.04
		4.9	5.15
		4.9	5.095
	L4	4.93	5.07
		4.95	5.04
		4.94	5.055
	L5	4.96	4.95
		4.89	4.93
		4.925	4.94
	L6	4.9	4.95
		4.91	4.90
		4.905	4.925

COMPROBACIÓN	
Volumen aparente (ml)	
123.04	
superficie	
148.43	
S/Vap	1.21
6/d	1.21
CUMPLE	

Muestra TM5

EVIDENCIA FOTOGRAFICA			muestra TM5			
COMPROBACIÓN				d1	d2	área(cm)
			l1	4.96	5.04	24.53
				4.95	4.86	
Volumen aparente (ml)			Prom	4.955	4.95	
			l2	5.06	4.95	25.17
				5.05	5.01	
S/Vap	1.20			5.055	4.98	
6/d	1.20		L3	4.97	4.95	24.40
CUMPLE				4.95	4.89	
				4.96	4.92	
			L4	5.06	4.87	24.72
				5.07	4.89	
				5.065	4.88	
			L5	5.07	4.95	25.10
				5.06	4.96	
				5.065	4.955	
			L6	5.08	4.97	25.22
				5.07	4.97	
				5.075	4.97	

Muestra TM6

EVIDENCIA FOTOGRAFICA	muestra TM6			
		d1	d2	área(cm)
	l1	4.94	4.85	23.86
		4.95	4.8	
	Prom	4.945	4.825	
	l2	5.1	4.84	24.71
		5.1	4.85	
		5.1	4.845	
	L3	4.94	4.84	23.93
		4.95	4.84	
		4.945	4.84	
	L4	5.19	4.83	25.15
		5.16	4.89	
		5.175	4.86	
	L5	5.13	4.84	25.08
		5.16	4.91	
		5.145	4.875	
	L6	5.18	4.95	25.44
		5.11	4.94	
		5.145	4.945	

COMPROBACIÓN	
Volumen aparente (ml)	
122.79	
superficie	
148.23	
S/Vap	1.21
6/d	1.21
CUMPLE	

Anexo 2. Determinar m_{sec} .

muestra TM1			
d(t)	w(gr)	comprobación	
di	288.266	Δdm	0.16
di ₂₄	287.794	No cumple peso constante	
di ₄₈	287.772	Δdm	0.008
m sec	287.772	Cumple, peso constante	
EVIDENCIA FOTOGRAFICA			
			

muestra TM2			
d(t)	w(gr)	comprobación	
di	290.960	Δdm	0.17
di ₂₄	290.456	No cumple peso constante	
di ₄₈	290.445	Δdm	0.004
m sec	290.445	Cumple, peso constante	
EVIDENCIA FOTOGRAFICA			
			

muestra TM3			
d(t)	w(gr)	comprobación	
di	269.833	Δdm	0.17
di ₂₄	269.361	No cumple peso constante	
di48	269.348	Δdm	0.005
m sec	269.348	Cumple, peso constante	
EVIDENCIA FOTOGRAFICA			
			

muestra TM4			
d(t)	w(gr)	comprobación	
di	273.509	Δdm	0.03
di ₂₄	273.419	Cumple, peso constante	
di48	273.408	Δdm	0.004
m sec	273.408	Cumple, peso constante	
EVIDENCIA FOTOGRAFICA			
			

muestra TM5			
d(t)	w(gr)	comprobación	
di	281.283	Δdm	0.03
di ₂₄	281.188	Cumple, peso constante	
di ₄₈	281.180	Δdm	0.003
m sec	281.180	Cumple, peso constante	
EVIDENCIA FOTOGRAFICA			
			

muestra TM6			
d(t)	w(gr)	comprobación	
di	274.493	Δdm	0.03
di ₂₄	274.41	Cumple, peso constante	
di48	274.405	Δdm	0.002
m sec	274.405	Cumple, peso constante	
EVIDENCIA FOTOGRAFICA			
			

Anexo 3. Determinar índices físicos

muestra TM1			
porosidad abierta			
m sec	287.772	Φ_a	
m sat	295.821		7.432%
m im	187.52		
masa especifica aparente seca (gr/cm3)			
m sec	287.772	$(\rho_{a_{sec}})$	
m sat	295.821		2.657
m im	187.52		
densidad corregida o del esqueleto (gr/cm3)			
m sec	287.772	d_{skel}	
m sat	295.821		2.870
m im	187.52		
coeficioente de absorción de agua			
0.028			

muestra TM2			
porosidad abierta			
m sec	290.445	Φ_a	
m sat	297.051		6.205%
m im	190.58		
masa especifica aparente seca (gr/cm3)			
m sec	290.445	$(\rho_{a_{sec}})$	
m sat	297.051		2.728
m im	190.58		
densidad corregida o del esqueleto (gr/cm3)			
m sec	290.445	d_{skel}	
m sat	297.051		2.908
m im	190.58		
coeficioente de absorción de agua			
0.023			

muestra TM3			
porosidad abierta			
m sec	269.348	Φ_a	
m sat	277.94		8.378%
m im	175.39		
masa especifica aparente seca (gr/cm3)			
m sec	269.348	$(\rho_{a_{sec}})$	
m sat	277.94		2.627
m im	175.39		
densidad corregida o del esqueleto (gr/cm3)			
m sec	269.348	d_{skel}	
m sat	277.94		2.867
m im	175.39		
coeficioente de absorción de agua			
0.032			

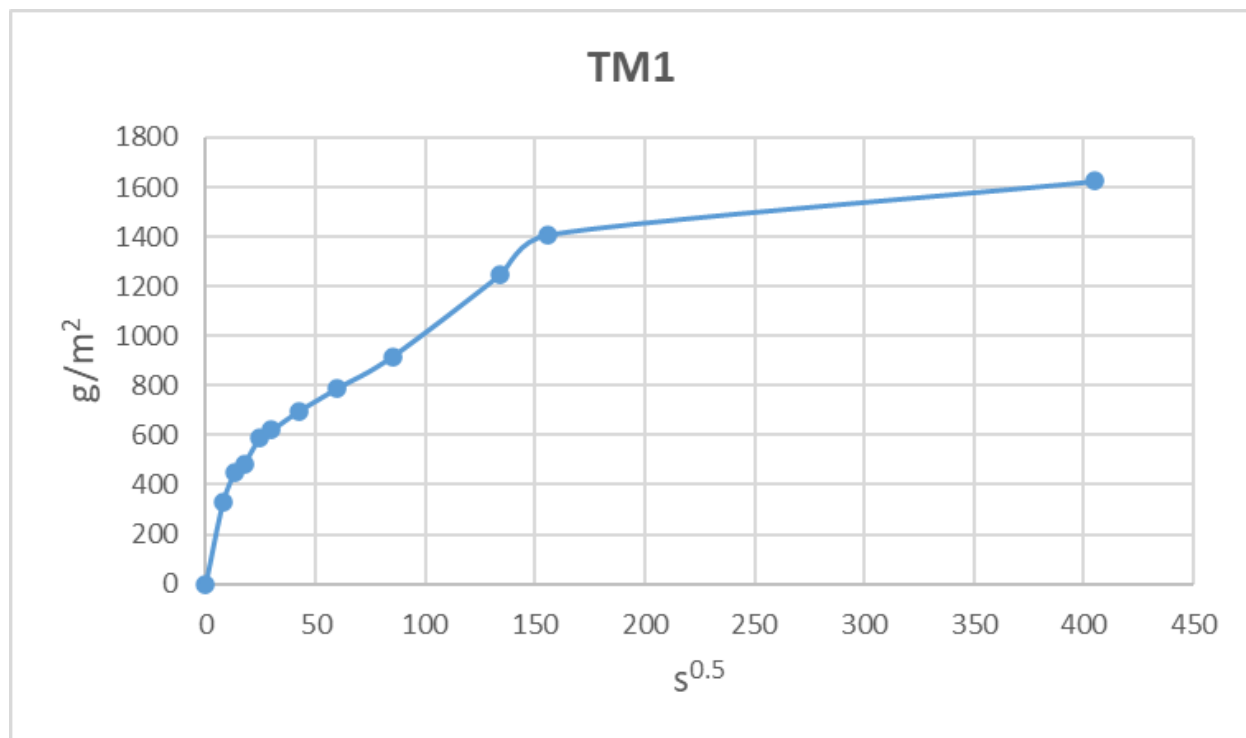
muestra TM4			
porosidad abierta			
m sec	273.408	Φ_a	
m sat	280.428		6.949%
m im	179.4		
masa especifica aparente seca (gr/cm3)			
m sec	273.408	$(\rho_{a_{sec}})$	
m sat	280.428		2.706
m im	179.4		
densidad corregida o del esqueleto (gr/cm3)			
m sec	273.408	d_{skel}	
m sat	280.428		2.908
m im	179.4		
coeficioente de absorción de agua			
0.026			

muestra TM5			
porosidad abierta			
m sec	281.180	Φ_a	
m sat	287.075		5.715%
m im	183.93		
masa especifica aparente seca (gr/cm3)			
m sec	281.180	$(\rho_{a_{sec}})$	
m sat	287.075		2.726
m im	183.93		
densidad corregida o del esqueleto (gr/cm3)			
m sec	281.180	d_{skel}	
m sat	287.075		2.891
m im	183.93		
coeficioente de absorción de agua			
0.021			

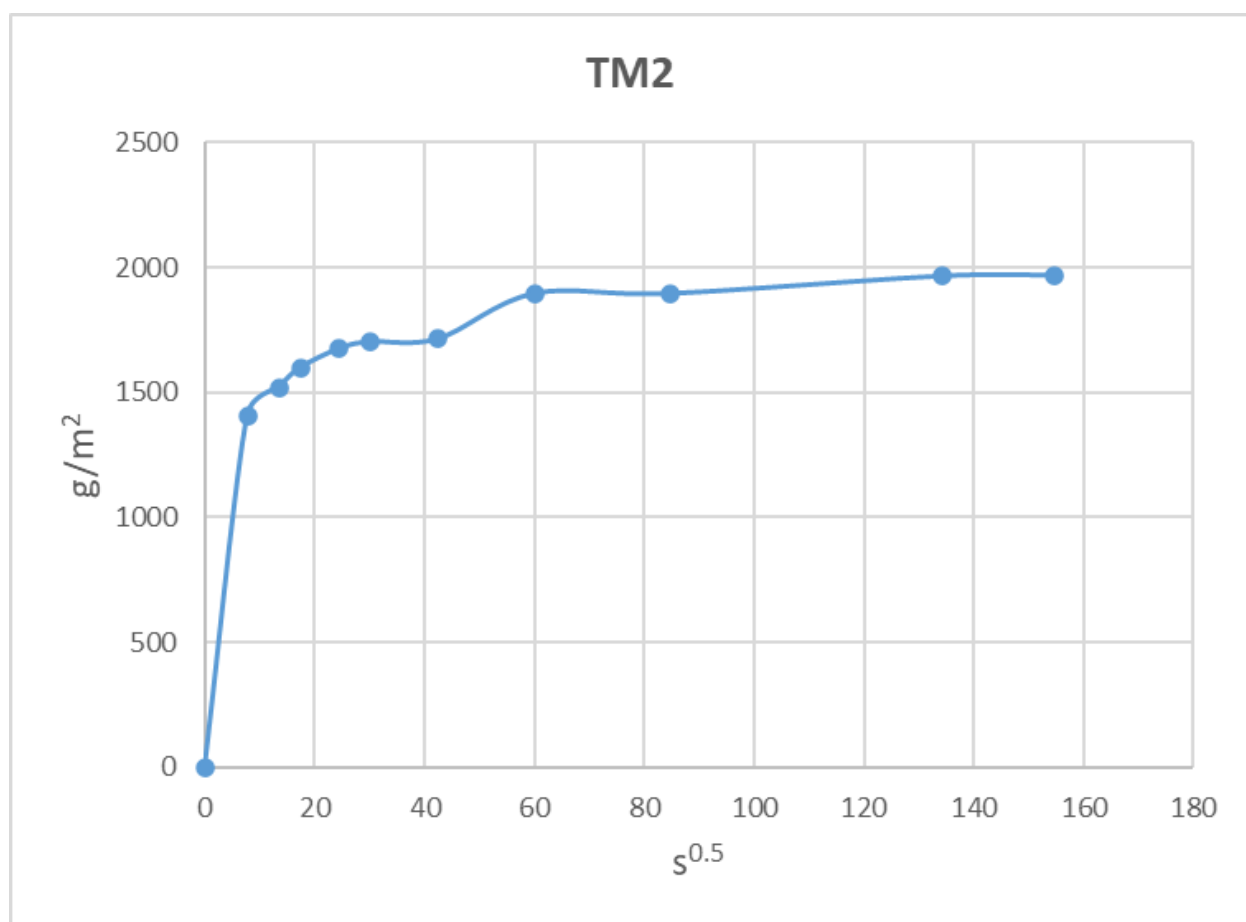
muestra TM6			
porosidad abierta			
m sec	274.405	Φ_a	
m sat	280.993		7.151%
m im	188.86		
masa especifica aparente seca (gr/cm3)			
m sec	274.405	$(\rho_{a_{sec}})$	
m sat	280.993		2.978
m im	188.86		
densidad corregida o del esqueleto (gr/cm3)			
m sec	274.405	d_{skel}	
m sat	280.993		3.208
m im	188.86		
coeficioente de absorción de agua			
0.024			

Anexo 4. Absorción por capilaridad (Becerra, 2009).

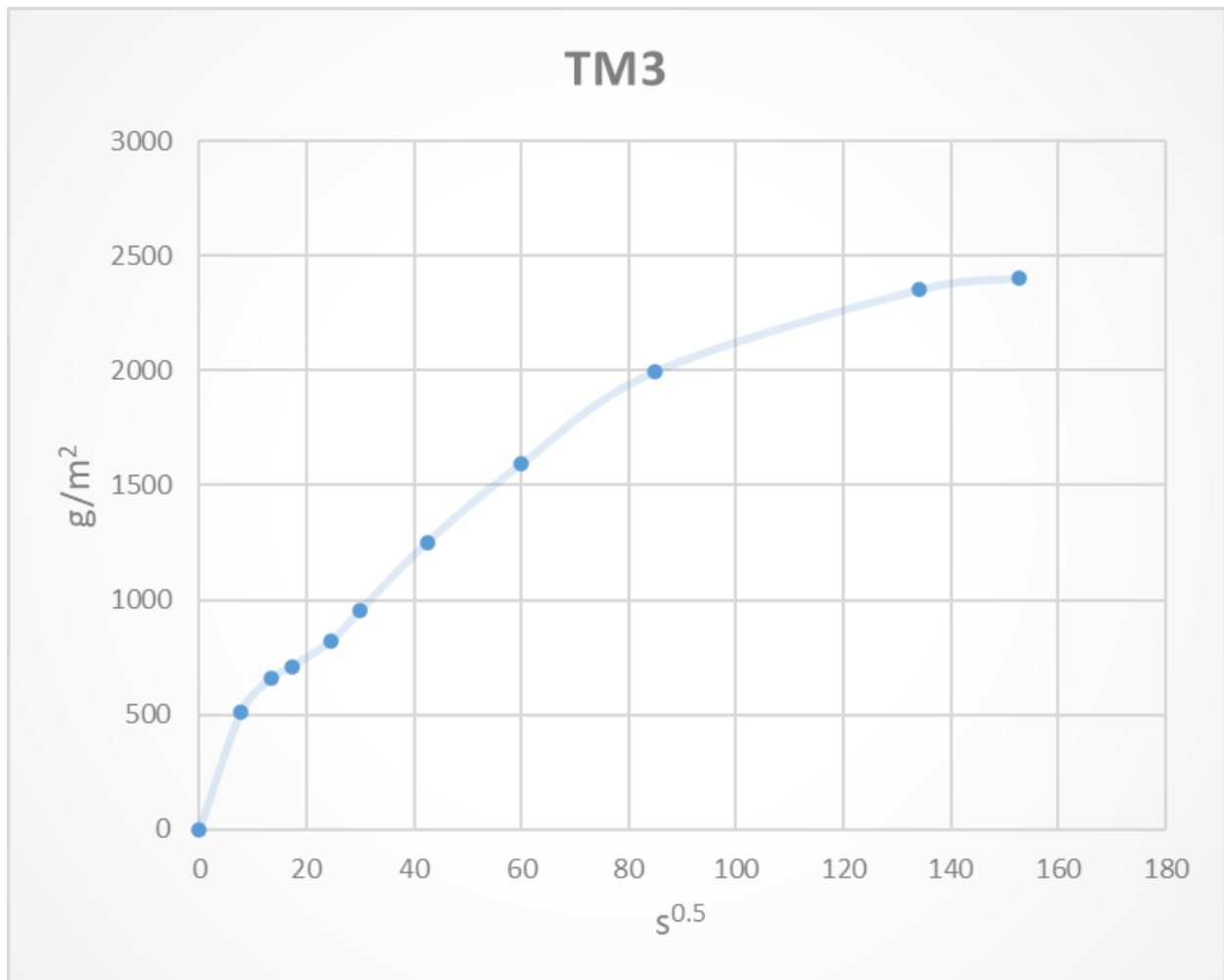
TM1							
t(h)	T(min)	T(seg)	S ²	A(m ²)	m0(g)	mi	Qi
	0	0	0	0.002595	287.772	288.43	0
	1	60	7.745966692	0.002595	287.772	288.62	326.782274
	3	180	13.41640786	0.002595	287.772	288.94	450.096339
	5	300	17.32050808	0.002595	287.772	289.02	480.924855
	10	600	24.49489743	0.002595	287.772	289.3	588.824663
	15	900	30	0.002595	287.772	289.38	619.653179
	30	1800	42.42640687	0.002595	287.772	289.58	696.72447
1	60	3600	60	0.002595	287.772	289.82	789.210019
2	120	7200	84.85281374	0.002595	287.772	290.15	916.377649
5	300	18000	134.1640786	0.002595	287.772	291.01	1247.7842
6.766666667	406	24360	156.0769041	0.002595	287.772	291.43	1409.63391
45.63333333	2738	164280	405.3146926	0.002595	287.772	291.99	1625.43353



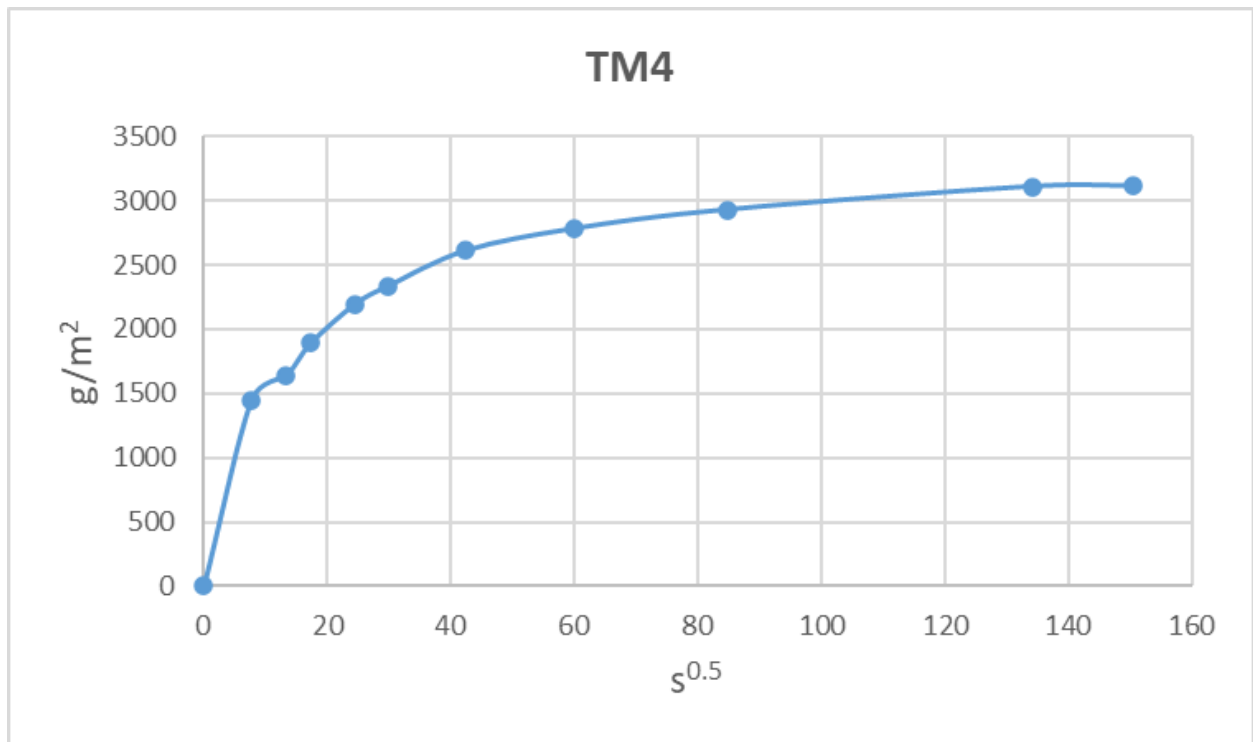
TM2							
t(h)	T(min)	T(seg)	S^2	A(m^2)	m0(g)	mi	Qi
	0	0	0	0.002588	290.445	290.445	0
	1	60	7.745966692	0.002588	290.445	294.09	1408.42349
	3	180	13.41640786	0.002588	290.445	294.38	1520.47913
	5	300	17.32050808	0.002588	290.445	294.58	1597.75889
	10	600	24.49489743	0.002588	290.445	294.78	1675.03864
	15	900	30	0.002588	290.445	294.85	1702.08655
	30	1800	42.42640687	0.002588	290.445	294.88	1713.67852
1	60	3600	60	0.002588	290.445	295.35	1895.28594
2	120	7200	84.85281374	0.002588	290.445	295.35	1895.28594
5	300	18000	134.1640786	0.002588	290.445	295.53	1964.83771
6.633333333	398	23880	154.5315502	0.002588	290.445	295.54	1968.7017



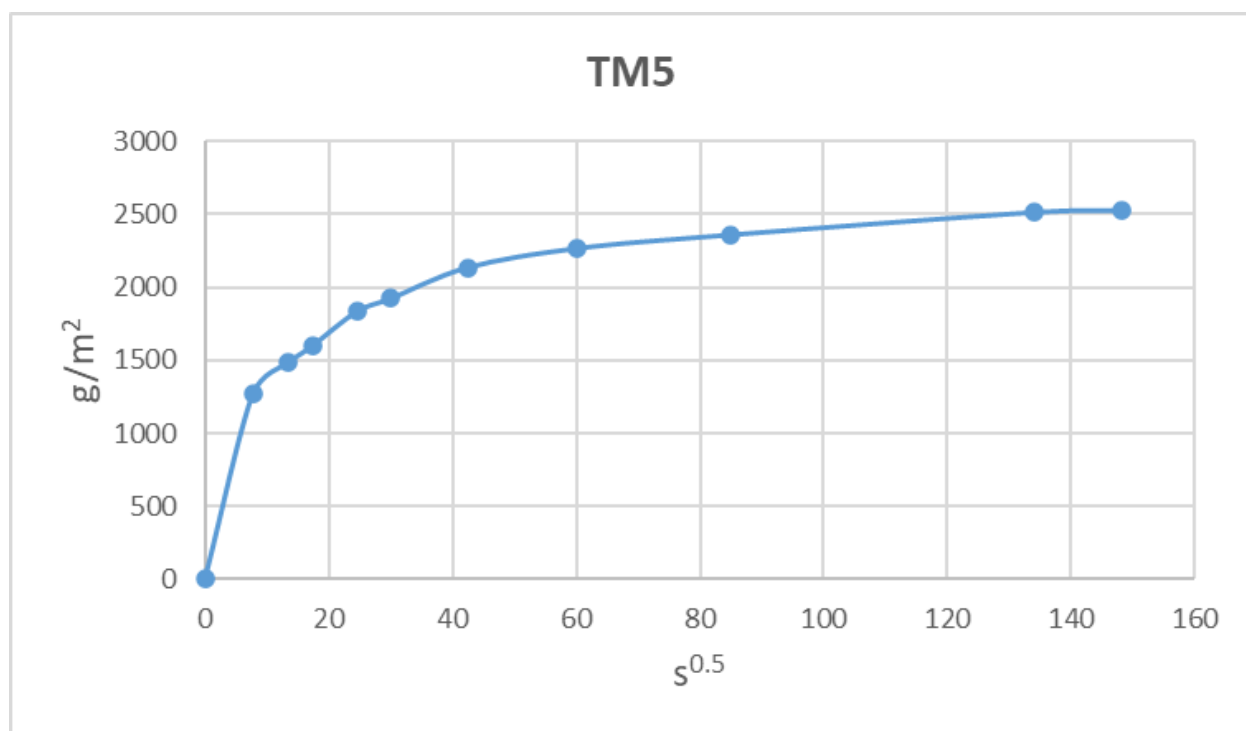
TM3							
t(h)	T(min)	T(seg)	S ²	A(m ²)	m0(g)	mi	Qi
	0	0	0	0.002573	269.34	270	0
	1	60	7.745966692	0.002573	269.34	270.65	509.134297
	3	180	13.41640786	0.002573	269.34	271.03	656.822108
	5	300	17.32050808	0.002573	269.34	271.17	711.233407
	10	600	24.49489743	0.002573	269.34	271.45	820.056005
	15	900	30	0.002573	269.34	271.8	956.084252
	30	1800	42.42640687	0.002573	269.34	272.56	1251.45987
1	60	3600	60	0.002573	269.34	273.44	1593.47375
2	120	7200	84.85281374	0.002573	269.34	274.47	1993.78545
5	300	18000	134.1640786	0.002573	269.34	275.39	2351.34542
6.483333333	389	23340	152.7743434	0.002573	269.34	275.52	2401.87019



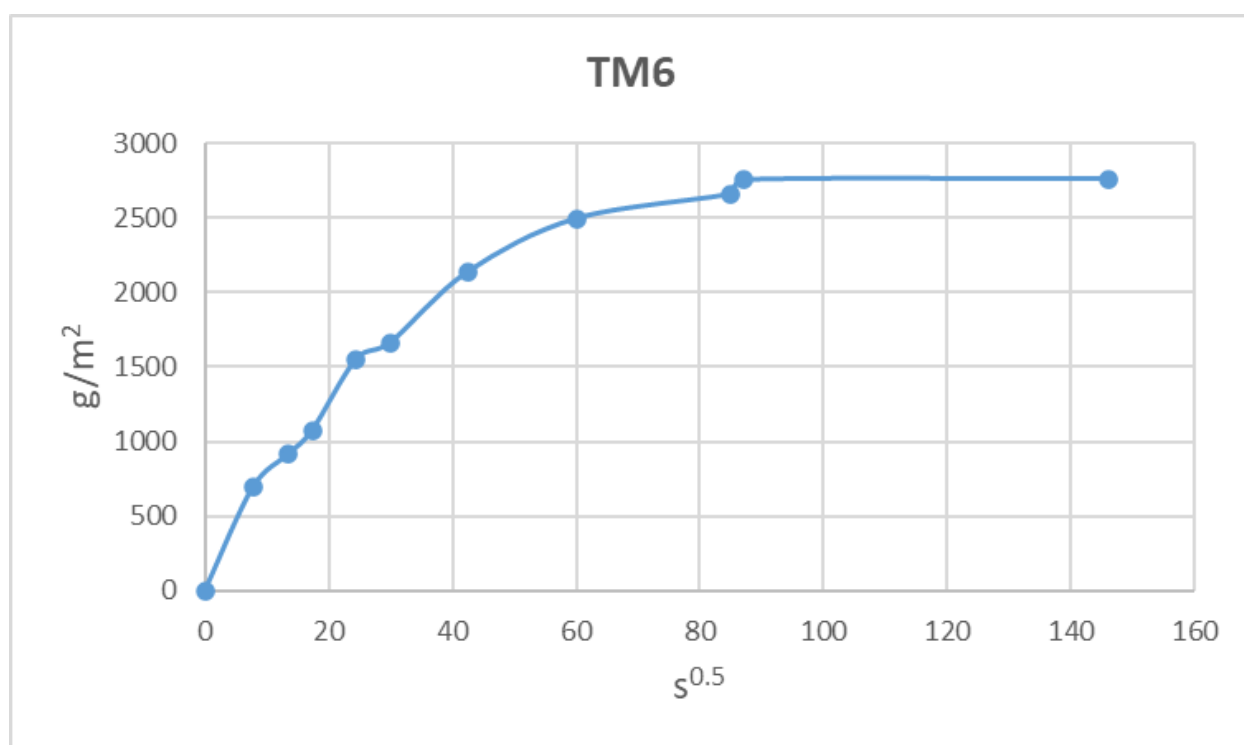
TM4							
t(h)	T(min)	T(seg)	S ²	A(m ²)	m0(g)	mi	Qi
	0	0	0	0.002502	273.408	273.408	0
	1	60	7.745966692	0.002502	273.408	277.04	1451.63869
	3	180	13.41640786	0.002502	273.408	277.52	1643.48521
	5	300	17.32050808	0.002502	273.408	278.14	1891.28697
	10	600	24.49489743	0.002502	273.408	278.9	2195.04396
	15	900	30	0.002502	273.408	279.26	2338.92886
	30	1800	42.42640687	0.002502	273.408	279.94	2610.71143
1	60	3600	60	0.002502	273.408	280.37	2782.57394
2	120	7200	84.85281374	0.002502	273.408	280.74	2930.45564
5	300	18000	134.1640786	0.002502	273.408	281.19	3110.31175
6.283333333	377	22620	150.3994681	0.002502	273.408	281.2	3114.30855



TM5							
t(h)	T(min)	T(seg)	S ²	A(m ²)	m0(g)	mi	Qi
	0	0	0	0.002453	281.18	281.18	0
	1	60	7.745966692	0.002453	281.18	284.29	1267.8353
	3	180	13.41640786	0.002453	281.18	284.82	1483.89727
	5	300	17.32050808	0.002453	281.18	285.1	1598.04321
	10	600	24.49489743	0.002453	281.18	285.68	1834.48838
	15	900	30	0.002453	281.18	285.9	1924.17448
	30	1800	42.42640687	0.002453	281.18	286.42	2136.1598
1	60	3600	60	0.002453	281.18	286.74	2266.61231
2	120	7200	84.85281374	0.002453	281.18	286.97	2360.37505
5	300	18000	134.1640786	0.002453	281.18	287.35	2515.2874
6.1	366	21960	148.1890684	0.002453	281.18	287.38	2527.51733



TM6							
t(h)	T(min)	T(seg)	S ²	A(m ²)	m0(g)	mi	Qi
	0	0	0	0.002544	274.41	274.41	0
	1	60	7.745966692	0.002544	274.41	276.17	691.823899
	3	180	13.41640786	0.002544	274.41	276.73	911.949686
	5	300	17.32050808	0.002544	274.41	277.14	1073.11321
	10	600	24.49489743	0.002544	274.41	278.36	1552.67296
	15	900	30	0.002544	274.41	278.64	1662.73585
	30	1800	42.42640687	0.002544	274.41	279.84	2134.43396
1	60	3600	60	0.002544	274.41	280.75	2492.13836
2	120	7200	84.85281374	0.002544	274.41	281.17	2657.2327
2.1	126	7560	86.94826048	0.002544	274.41	281.41	2751.57233
5.933333333	356	21360	146.1506073	0.002544	274.41	281.43	2759.43396



Anexo 5. Módulo de rotura travertino de Málaga.

	Formato del Sistema de Gestión de Calidad	Este documento es propiedad intelectual de López Hermanos Geotécnica y Aguas Subterráneas S.A.S.	
	EJECUCIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO		
	INFORME DE ENSAYO: MÓDULO DE ROTURA	Versión No. 0	4/12/2018
		EL-INF-55	ASTM C99

Número de ensayo: 1029

Solicitado por: JHEYSON ANTONIO SUÁREZREATIGA

Dirección: Carrera 2 bis 41-15 Tunja

NIT./C.C.: 1049432339

Tel.: 3185962846

Obra: Determinar la calidad del material

Orden: 23209

Máquina de ensayo: MASTER LOADER HM 3000

Velocidad de deformación ensayo:

1.3 mm/min

Ref: travertino 1

Tipo de muestra: Tableta Travertino

Cantera procedencia: Obra

Referencia: travertino 1

Longitud del baldosa (mm)	Ancho del Baldosa (mm)	Altura del baldosa (mm)	Longitud de la luz libre (mm)	Módulo de rotura				
				Carga		Esfuerzo		
				kN	lbf	kg/cm ²	MPa	psi
201	100	30.5	200	2.770	623	91.0	8.90	1290

OBSERVACIONES: Ninguna

EJECUTÓ	REVISÓ	APROBÓ
EUGENIO PARRA	ING. ERICK FABIÁN NEMPEQUE ALFONSO	ING. ERICK FABIÁN NEMPEQUE ALFONSO
LABORATORISTA	TP. 26202-386053 CND	TP. 26202-386053 CND

Nota: Este folio no se deberá reproducir de forma parcial o total sin la aprobación por escrito de López Hermanos Geotécnica y Aguas Subterráneas S.A.S.

Los resultados mostrados en este informe corresponden únicamente a la(s) muestra(s) ensayada(s)



	Formato del Sistema de Gestión de Calidad	Este documento es propiedad intelectual de López Hermanos Geotécnica y Aguas Subterráneas S.A.S.	
	EJECUCIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO		
	INFORME DE ENSAYO: MÓDULO DE ROTURA	Versión No. 0	4/12/2018
		EL-INF-55	ASTM C99

Número de ensayo:

1030

Solicitado por:

JHEYSON ANTONIO SUÁREZREATIGA

Ref:

travertino 2

Dirección:

Carrera 2 bis 41-15 Tunja

Tipo de muestra:

Tableta Travertino

NIT./C.C.:

1049432339

Cantera procedencia:

Obra

Tel.:

3185962846

Referencia:

travertino 2

Obra:

Determinar la calidad del material

Orden:

23209

Máquina de ensayo:

MASTER LOADER HM 3000

Velocidad de deformación ensayo:

1.3 mm/min

Longitud del baldosa (mm)	Ancho del Baldosa (mm)	Altura del baldosa (mm)	Longitud de la luz libre (mm)	Módulo de rotura				
				Carga		Esfuerzo		
				kN	lbf	kg/cm ²	MPa	psi
200.9	100	30.4	200	2.970	668	98.0	9.60	1390

OBSERVACIONES:

Ninguna

EJECUTÓ	REVISÓ	APROBÓ
EUGENIO PARRA	ING. ERICK FABIÁN NEMPEQUE ALFONSO	ING. ERICK FABIÁN NEMPEQUE ALFONSO
LABORATORISTA	TP. 26202-386053 CND	TP. 26202-386053 CND

Nota: Este folio no se deberá reproducir de forma parcial o total sin la aprobación por escrito de López Hermanos Geotécnica y Aguas subterráneas S.A.S.

Los resultados mostrados en este informe corresponden únicamente a la(s) muestra(s) ensayada(s)

	Formato del Sistema de Gestión de Calidad	Este documento es propiedad intelectual de López Hermanos Geotécnica y Aguas Subterráneas S.A.S	
	EJECUCIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO	Versión No. 0	4/12/2018
	INFORME DE ENSAYO: MÓDULO DE ROTURA	EL-INF-55	ASTM C99

Número de ensayo:

1031

Solicitado por:

JHEYSON ANTONIO SUÁREZREATIGA

Dirección:

Carrera 2 bis 41-15 Tunja

NIT./C.C.:

1049432339

Tel.:

3185962846

Obra:

Determinar la calidad del material

Orden:

23209

Máquina de ensayo:

MASTER LOADER HM 3000

Velocidad de deformación ensayo:

1.3 mm/min

Ref:

travertino 3

Tipo de muestra:

Tableta Travertino

Cantera procedencia:

Obra

Referencia:

travertino 3

Longitud del baldosa (mm)	Ancho del baldosa (mm)	Altura del baldosa (mm)	Longitud de la luz libre (mm)	Módulo de rotura				
				Carga		Esfuerzo		
				kN	lbf	kg/cm ²	MPa	psi
200	100	30.3	200	2.870	645	96.0	9.40	1360

OBSERVACIONES:

Ninguna

EJECUTÓ	REVISÓ	APROBÓ
EUGENIO PARRA	ING. ERICK FABIÁN NEMPEQUE ALFONSO	ING. ERICK FABIÁN NEMPEQUE ALFONSO
LABORATORISTA	TP. 25202-386053 CND	TP. 25202-386053 CND

Nota: Este folio no se deberá reproducir de forma parcial o total sin la aprobación por escrito de López Hermanos Geotécnica y Aguas subterráneas S.A.S

Los resultados mostrados en este informe corresponden únicamente a la(s) muestra(s) ensayada(s)



