

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES MERI PRODUCIDOS EN LA EXCAVACIÓN  
DE LOS TUNELES DEL CORREDOR VIAL CHIRAJARA – FUNDADORES



WILSON CAMILO FUENTES BAQUERO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
VILLAVICENCIO

2023

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES MERI PRODUCIDOS EN LA EXCAVACIÓN  
DE LOS TUNELES DEL CORREDOR VIAL CHIRAJARA – FUNDADORES

WILSON CAMILO FUENTES BAQUERO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Director

Mg. JESSICA MARIA RAMIREZ CUELLO

Ingeniería Civil

Magister en Ingeniería Civil con Énfasis en Infraestructura Vial

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
VILLAVICENCIO

2023

**Autoridades Académicas**

**Fray Álvaro José ARANGO RESTREPO, O.P**

Rector General

**Fray Eduardo GONZÁLEZ GIL, O. P.**

Vicerrector Académico General

**Fray José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O. P.**

Rector Sede Villavicencio

**Fray Rodrigo GARCÍA JARA, O. P.**

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

**Mg. Julieth Andrea Sierra Tobón**

Secretaria de División Sede Villavicencio

**Fray Inael SÁNCHEZ HERNÁNDEZ, O.P.**

Decano de División Sede Villavicencio

**I.C. Luis Fernando Díaz Cruz, Mg.**

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil

### **Dedicatoria**

*Este proyecto en primera instancia lo dedico a mi creador supremo, sin Él nada de esto sería posible, agradezco al pilar de mi vida, la mujer más fuerte del mundo e importante en mi vida, María de Jesús Peña, persona que me formo con unos cimientos tan fuertes como para soportar cualquier carga, recalando que todos podemos y que el camino al fracaso esta pavimentado con excusas, a mi familia, a mi madre por sus noches de desvelo y de aliento, a mis tíos, primos, al vigilante de la universidad que por varios días entendió que el no tener dinero para pagar el parqueadero solo sería un estado momentáneo y se unió a mi lucha, a mis docentes por su amor en su vocación y ser fuente inagotable de conocimiento puro para mi vida, a mi amada pareja, por no soltar mi mano en todo momento.*

*Todos mis logros los dedico a ellos.*

### **Agradecimientos**

*Agradezco a Dios y a la vida por permitirme ser un soñador más, por materializar este sueño y contar con el mejor equipo para lograr este objetivo, gracias a mi familia, gracias al equipo de la Universidad Santo Tomás, principalmente a mis guías en este camino, Jessica Ramírez Cuello y Juan Manuel Salgado quienes me han regalado una parte de lo más valioso de sus vidas, su tiempo, todo esto para ceñir mi carrera profesional, sin importar la hora o el momento siempre cuidaron de mi porvenir. Finalmente agradezco a quien lee este apartado de mi tesis, por permitir que mi experiencia en esta investigación trascienda y pueda ayudar a forjar el conocimiento de muchas más personas.*

### **Lista De Abreviaturas**

**MERI:** Materiales de excavación de reutilización industrial

**RCD:** Residuos de Construcción y Demolición

**INVIAS:** Instituto nacional de vías

**COVIANDINA:** Concesionaria vial andina

**ZODMES:** Zonas de Disposición de Materiales de Excavación Sobrantes

### **Resumen**

La presente investigación se enfocará en la caracterización y reutilización de materiales MERI “materiales térmicos naturales, de transición, roca meteorizada, roca diaclasada y roca sana provenientes de la excavación y construcción de los túneles” entre el corredor vial Chirajara – Fundadores.

Para la implementación del proyecto se efectuará una metodología de tipo mixta, ya que se desarrollará a partir de la observación, análisis e interpretación de las variables obtenidas y se determinaran algunas propiedades físicas y mecánicas de los materiales de excavación.

Finalmente, de este estudio se analiza que los componentes de dichos materiales, por su caracterización detallada mediante laboratorios y pruebas, se esclarece que no todo el material extraído de la excavación de un túnel debe terminar como disposición final en un ZODME y que si se dispone de propuestas nuevas los MERI-T no deberían ser considerados como escombros, residuos, desperdicios o sobrantes.

**Palabras claves:** Infraestructura, Obras de Ingeniería, Residuos, Túneles, ZODME

### **Abstract**

This research will focus on the characterization and reuse of MERI materials “natural thermal materials, transition materials, weathered rock, jointed rock and healthy rock from the excavation and construction of the tunnels” between the Chirajara – Fundadores road corridor.

For the implementation of the project, a mixed methodology will be used, since it will be developed from the observation, analysis and interpretation of the variables obtained and some physical and mechanical properties of the excavation materials will be determined.

Finally, this study analyzes that the components of said extracted materials, due to their detailed characterization through laboratories and tests, makes it clear that not all the material extracted from the excavation of a tunnel should end up as final disposal in a ZODME and that if has new proposals, the MERI-T should not be considered rubble, residue, waste or leftovers.

**Keywords:** Infrastructure, Engineering Works, Waste, Tunnels, ZODME

## Tabla de Contenido

Resumen .....	7
<b>Abstract .....</b>	<b>8</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>12</b>
<b>1. Planteamiento Del Problema .....</b>	<b>13</b>
<b>2. Objetivos .....</b>	<b>14</b>
2.1.    Objetivo General.....	14
2.2.    Objetivos Específicos .....	14
<b>3. Justificación .....</b>	<b>15</b>
<b>4. Alcance .....</b>	<b>16</b>
<b>5. Estado del Arte .....</b>	<b>17</b>
<b>5.1.    Antecedentes .....</b>	<b>17</b>
<b>6. Marco Teórico .....</b>	<b>19</b>
<b>7. Marco Conceptual.....</b>	<b>21</b>
<b>8. Marco Normativo .....</b>	<b>22</b>
<b>9. Marco Geográfico .....</b>	<b>23</b>
<b>10. Metodología.....</b>	<b>24</b>
<b>11. Desarrollo Metodológico .....</b>	<b>25</b>
11.1.    Fase 1: Identificación de los materiales que se extraen en las obras de excavación de los túneles del corredor vial Chirajara - Fundadores. ....	25
11.1.1    Revisión del Estado del Arte .....	25
11.1.2    Recopilar información existente y llevar a cabo la extracción de material presente en la zona. ....	25
11.1.3    Petrografía del Material.....	26
11.2.    Fase 2: Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales extraídos .....	28
11.2.1    Desgaste de los Materiales.....	28
11.2.2    Resistencia del Material .....	31
11.2.3    Ensayo a compresión uniaxial.....	31
11.2.4    Fase 3: Clasificación de los materiales extraídos según el uso que se debe implementar. 37	37
<b>12. Resultados e Impacto .....</b>	<b>38</b>
<b>13. Conclusiones .....</b>	<b>39</b>
<b>14. Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

**Listas De Tablas**

Tabla 1-Normatividad legal vigente.....	22
Tabla 2- Fase Inicial.....	24
Tabla 3-Fase Media.....	24
Tabla 4-Fase Final.....	24
Tabla 5- Procedimiento Petrografía.....	26
Tabla 6- Resultados Petrografía .....	28
Tabla 7- Definición de la Granulometría del Material.....	28
Tabla 8- Medida de especímenes.....	32
Tabla 9- Propiedades físicas y mecánicas de diversas rocas .....	33
Tabla 10-Densidad-Espécimen 8cm (Kg/m <sup>3</sup> ).....	33
Tabla 11 Densidad-Espécimen 10 cm (Kg/m <sup>3</sup> ) .....	34
Tabla 12 Densidad- Espécimen 13 cm (Kg/m <sup>3</sup> ) .....	34
Tabla 13 Compresión espécimen 8 cm .....	34
Tabla 14 Compresión espécimen 10cm.....	35
Tabla 15 Compresión espécimen 13 cm .....	35

**Lista De Figuras**

Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio .....	23
Figura 2. Metodología del Proyecto .....	24
Figura 3- Repositorio Institucional USTA .....	25
Figura 4-Anexos recolección de muestras .....	26
Figura 5- Fotografía del agregado bajo el estereomicroscopio.....	27
Figura 6-Granulometria.....	29
Figura 7 Ecuación Porcentaje de Perdidas .....	30
Figura 8-Resultados Maquina de los Ángeles .....	30
Figura 9-Extracción de núcleos .....	31
Figura 10- Desgaste de especímenes .....	32
Figura 11- Carga(kN) Vs Tiempo(s) .....	32
Figura 12- Gráfica Mpa vs Cilindros .....	35
Figura 13 Deformación frágil y dúctil bajo compresión, torsión y extensión.....	36
Figura 14- Cilindro 8cm sometido a compresión .....	36
Figura 15 Cilindro de 10cm sometido a compresión.....	37
Figura 16 Cilindro de 13cm sometido a compresión.....	37

## **Introducción**

Clasificación, reutilización y aprovechamientos son palabras bases en este estudio que parte de una pregunta ¿Qué usos se pueden implementar a los MERI producidos en la excavación de los túneles del corredor vial Chirajara - Fundadores para evitar el crecimiento de residuos y explotación de materiales? Colombia, país en constante crecimiento vial donde normalmente podemos ver proyectos de infraestructura en constante evolución, vías 4G, túneles de mayor magnitud, donde en la actualidad Colombia tiene el túnel más largo de América, conocido como el túnel del toyo con 9.7Km de longitud, comunicando del punto A al punto B con una sola finalidad, disponer de un conducto.

Visto desde otra perspectiva cada que se proyecta la construcción de un túnel, se estaría proyectando la posibilidad de disponer de una cantera de material MERI-T, (Materiales de excavación de reutilización industrial producidos durante la excavación de un túnel) donde en la mayoría de los casos dicho material termina en ZODMES, sirviendo como desecho de relleno, desaprovechando su reutilización, llenando miles de metros cúbicos en terrenos a lo largo de la ejecución de los proyectos (túneles), donde el principal objetivo es la estabilidad del mismo, evitar que ocurran fallas inesperadas, pero no el aprovechamiento de miles de metros cúbicos de dicho material que es extraído, los MERI – T en reiteradas ocasiones han sido utilizados en proyectos para la producción de agregados en concretos y pavimentos donde dicha cantidad no asciende a más del 24,9% de aprovechamiento, el 75.1% es dirigido a ZODMES.

La finalidad de este estudio es analizar los componentes de dichos materiales extraídos, realizar una caracterización detallada mediante laboratorios y pruebas, esclareciendo que no todo el material extraído de la excavación de un túnel debe terminar como disposición final en un ZODME, que si disponemos de propuestas nuevas los MERI-T no serían considerados como escombros, residuos, desperdicios o sobrantes.

## 1. Planteamiento Del Problema

Colombia, un país en vía de desarrollo en el cual se continúa evidenciando notoriamente el crecimiento de la infraestructura vial, puesto que el gobierno apostó a proyectos de corredores viales 4G.

Según el último reporte de la Cámara Colombiana de Infraestructura – CC, el día 25 de febrero de 2022 por Juan Martín Caicedo, los proyectos aprobados de las concesiones viales en el país tienen un avance del 64.8% de ejecución, generando desarrollo tanto económico como social debido al aumento de empleos y posibilidades del comercio entre departamentos.

La caracterización de los materiales MERI T producidos en la excavación de los túneles del corredor vial Chirajara - Fundadores y la reutilización industrial que pueden ofrecer estos materiales extraídos de la construcción de un túnel vial buscan determinar las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los componentes extraídos con el fin de realizar la clasificación de dichos materiales para dar un buen aprovechamiento y evitar el crecimiento de residuos en lugares de acopio. Finalmente, la caracterización de los MERI T genera un impacto positivo debido a la alta demanda de reutilización de materiales, ayudando a la restauración y protección de los recursos naturales, de igual manera contribuye a disminuir la explotación de minas que generan la materia prima, en donde el transporte, la ilegalidad y los costos exagerados, causan una problemática.

Durante el desarrollo de cualquier proyecto de infraestructura vial se generan modificaciones e intervenciones, sin embargo se proveen planes en todos los aspectos de mitigación de impactos al entorno que proporcione la ejecución de dicho trabajo, tanto económico, social y ambiental, es así que la complejidad del proyecto ha sido sujeta al estado de la zona, es decir en la topografía, geotecnia, hidrología del área intervenida, donde existen cambios significativos en el caso de la extracción de materiales y modificaciones mecánicas de los terrenos.

A partir de lo anterior surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué usos se pueden implementar a los MERI producidos en la excavación de los túneles del corredor vial Chirajara - Fundadores para evitar el crecimiento de residuos y explotación de materiales?

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo General**

Caracterizar los materiales MERI producidos en la excavación de los túneles del Corredor Vial Chirajara-Fundadores, examinando su reutilización industrial.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Identificar los materiales que se extraen en las obras de excavación de los túneles del corredor vial Chirajara - Fundadores.
- Determinar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales extraídos.
- Clasificar los materiales extraídos según el uso que se debe implementar.

### 3. Justificación

Con el pasar de los años el hombre emprende nuevas búsquedas o investigaciones, para satisfacer una necesidad o dar solución a un problema. En la ingeniería, el desarrollo sostenible y la innovación van de la mano, mejorando la calidad de vida mediante el uso de obras civiles. Si bien es cierto, lo anterior conlleva a miles de excavaciones y metros cúbicos de materiales removidos, que después de darle una clasificación se podrá determinar racionalmente si este debería ser llevado a un botadero, escombrera o ZODME y/o darle otro uso aplicativo.

La presente investigación se enfocará en la caracterización y reutilización de materiales MERI “materiales térmicos naturales, materiales de transición, roca meteorizada, roca diaclasada y roca sana se deben remover en toda obra de ingeniería”, provenientes de la excavación y construcción de los túneles entre el corredor vial Chirajara – Fundadores.

Adicionalmente, durante la construcción de un túnel se desarrolla otra serie de materiales, más conocidos como “escombros” y “residuos de todo tipo”, esto no significa que se deban desechar y confinar en sitios específicos, muchos de ellos pueden llegar a mezclarse con los materiales MERI para mejorar sus propiedades, luego de la caracterización, con el fin de fortalecer la idea y de beneficiar la reutilización del material extraído en la construcción, puesto que la sociedad demanda cada vez más materiales sostenibles, duraderos y eficaces.

Luego de entender la principal razón de dicha investigación, teniendo como primordial objetivo la clasificación de los materiales producidos durante la construcción de los túneles del corredor vial Chirajara - Fundadores, así como en la necesidad de indicar posibles usos, luego de haber analizado, clasificado y obtenido sus propiedades mecánicas, mineralógicas y volumen, se plantea direccionar la utilización de los materiales MERI T

#### **4. Alcance**

El proyecto de investigación en el corredor vial Bogotá - Villavicencio, tramo Chirajara - Fundadores, es uno de los proyectos con mayor dificultad que se está desarrollando en el país, el cual cuenta con un avance del 100% de ejecución entre su corredor vial el día 7 de julio de 2022. El tramo Chirajara - Fundadores tiene un total 32.6 km en dos calzadas, en los cuales se han construido 6 túneles con un total de 10.5 km, un total de 5 km en viaductos y 16,5 km de carretera. Es un proyecto vial de alta inversión en Colombia, con innovación de tecnología y estrategias de construcción.

Este proyecto pretende realizar la caracterización de los materiales MERI producidos en la excavación de los túneles entre el corredor vial Chirajara-Fundadores en tres etapas: 1. la retrospectiva, a través de una revisión e identificación de dichos materiales 2. exploratoria, por medio de una salida de campo para realizar la inspección de los residuos provenientes de tres túneles ubicados entre el corredor vial Chirajara y Villavicencio; y 3. la clasificación de los materiales MERI, los cuales constituyen el material rocoso extraído de los túneles.

## 5. Estado del Arte

### 5.1. Antecedentes

Propone una metodología para la utilización de los MERI, puesto que su reutilización no supera el 30% del material el cual se está usando dentro de los túneles, teniendo en cuenta que el no hacer uso de dichos materiales aumentara considerablemente el daño ambiental, debido a que su reutilización parcial estaría utilizada para crudo y en el mayor de los casos, el material sería desechado (Correa, 2021) No obstante, al afrontar alguna crisis de materiales de construcción este generaría soluciones a futuras problemáticas, remplazando temporalmente fuentes tradicionales de extracción de materiales como, gravilleras o canteras, lo cual posiblemente podría ser una fuente de trabajo para cooperativas campesinas interesadas en obtener un beneficio económico con esta labor.

Dentro de la investigación realizada por (Correa, 2021) la cual tiene como objetivo la utilización de los materiales MERI-T (Materiales de Excavación de Reutilización Industrial) producidos durante la excavación de un túnel vial. Si se introduce el concepto de la utilización de recurso de forma racional, una base técnica común para el mejor uso de estos materiales determina que un túnel es una obra que se realiza con la finalidad de disponer de un conducto, donde se podría denominar al túnel como una cantera subterránea, por ende se debe saber que los materiales de excavación en túneles han sido considerados como materiales de poco valor y poco utilizados, porcentualmente se habla que ni siquiera el 25% que son extraídos en la construcción se reutilizan.

Así mismo (Suárez et. al.,2018) menciona el uso de los MERI en diversos países, donde resalta que Alemania, España, Polonia y Reino unido, con el pasar del tiempo han estudiado detalladamente la utilización de los MERI como material para carreteras, lo cual ha permitido emplear el uso de dicho material extraído de obras y disponiéndoles una reutilización, creando un ciclo infinito ya que su condición de finalización no se alcanza, es decir, aquel material que sería desechado se le da un aprovechamiento para volver a ser utilizado como material de construcción. Un gran referente es Alemania en la cuenca de Ruhr donde se empleó la construcción de un terraplén con aproximadamente un millón de toneladas de material MERI.

(Raúl, 2020) Menciona sobre la incorporación de residuos mineros a materiales de la construcción, y plantea como objetivo principal analizar la viabilidad de la adición de dos tipos de MERI procedentes de minas. Este autor llevó a cabo un estudio experimental para comprobar el comportamiento de un tipo de cemento con la incorporación de los residuos procedentes de dos explotaciones mineras en España.

Por otro lado, (Bastidas et. al 2017) determina que un 40% de los MERI vuelven a introducirse como relleno de pozos y otros usos, afirmando que se han empleado con diferentes fines, donde porcentualmente el 10% tiene aplicaciones externas, teniendo en cuenta que Polonia en su mayoría se destina para la construcción de carreteras, diques, fabricación de clínquer y fabricación de árido ligero.

El instituto de investigación del carbón contiguo con especialistas del sector de la construcción y transporte, efectuaron un proyecto el cual llevo por nombre “instrucciones para el empleo de los estériles en obras de ingeniería” este estudio evidencio que el uso de los MERI en obras se podría comparar con los materiales utilizados tradicionalmente en la construcción de terraplenes. (Bastidas et. al 2017)

Estos materiales de excavación no deben ser considerados más como desechos o sobrantes, si no como preciosos recursos por valorizar. De igual manera sirven como agregados para los materiales MERI y buscan de igual manera mejorar dichas propiedades.

Según (Suárez et. al.,2018) mencionan en su proyecto titulado “Métodos innovadores para el reciclaje eco compatible y sostenible de los materiales procedentes de la excavación de túneles”, plantean que el uso adecuado de dichos materiales ayuda en las mejoras y cuidados del medio ambiente.

## 6. Marco Teórico

Inicialmente en el comienzo de las obras, los residuos eran de tipo orgánico por lo cual eran asimilados por el medio ambiente, los pobladores eran de tipo nómada y abandonan los escombros al marcharse de sus campamentos; con el desarrollo de la agricultura y la ganadería se comenzaron a evidenciar los primeros asentamientos y los residuos abandonados en vertederos. Una de las problemáticas más destacadas en Colombia es el uso adecuado de la gestión integral de los RCD, es el incumplimiento de las normas del sector, y la carencia de lineamientos e instrumentos de gestión ambiental para su adecuado manejo, aprovechamiento y valorización. (Suárez et. al.,2018)

Según el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición de España dentro de los RCD se tienen en cuenta tierras de excavación limpia, sin embargo, también mencionan que dichas tierras son excluidas al no considerarse residuos, es por esto que los RCD se dividen en tres grandes grupos, con sus respectivas subdivisiones como se describe en la siguiente tabla.

Estos residuos MERI son considerados inertes, no peligrosos, con un alto nivel de valorización y aprovechamiento. Aunque no existe una composición particular de RCD (Residuos de Construcción y Demolición), estos varían según el tipo de estructura, proceso de demolición y sistemas de gestión ambiental empleados.

Gran parte de estos residuos “escombros” se eliminan en vertederos sin ningún tipo de recuperación o reutilización, lo que genera importantes preocupaciones ambientales y económicas. La disposición inadecuada de estos residuos conlleva a una problemática ambiental en diferentes ámbitos: suelo, atmósfera, agua, flora y fauna y paisaje. Los MERI de igual manera se han empleado para otros fines así como rellenos y depósitos; alrededor del 40% de este material vuelve a introducirse como relleno de pozos y otras utilidades internas, mientras que el 10% tienen aplicaciones externas ()

(Suarez, 2017), mencionan que en ciudades como Ibagué y Villavicencio se ha visto la necesidad de promover la gestión integral de estos residuos y diseñar programas de aprovechamiento con el fin de solucionar la problemática generada por su inadecuada disposición.

Según (Vidal, 2015) Colombia al igual que en el resto de los países de América Latina, la gestión de los residuos se centra en los residuos sólidos urbanos, ya que, aunque la gestión y el manejo de los residuos de construcción y demolición ya están ordenados, muchos de los agentes relacionados hacen caso omiso, perjudicando el entorno y aumentando la cantidad de escombreras ilegales en estos países.

Los materiales de excavación producidos en los diferentes proyectos de infraestructura, en general, y de los de construcción de túneles viales, en particular, son

depositados, en su gran mayoría (entre un 70 y un 75 %) en un depósito conocido hoy día como ZODMES los cuales son zonas de manejo de escombros y material de excavación), los materiales producidos durante la excavación del túnel son materiales sanos, densos, duros y de alta a medianamente fracturados.

## 7. Marco Conceptual

**Materiales de Excavación de Reutilización Industrial.** Los MERI son todos aquellos materiales térmicos naturales (suelos, materiales de transición, roca meteorizada, roca diaclasada y roca sana) que se deben remover en la construcción de toda obra de ingeniería, en este caso particular, un túnel vial, pero también de la construcción de una vía, una presa, un ducto subterráneo, las vías principales en una explotación minera subterránea o la fundación de una edificación; queremos referirnos a aquellos materiales térreos naturales (suelos, rocas y materiales de transición) que se deben remover en la construcción de toda obra de ingeniería, en este caso particular, un túnel vial. (Correa, 2021)

**Túnel.** Un túnel es una obra que se realiza con la finalidad de disponer de un ducto (un vacío) subterráneo estable; por su parte, una cantera es un sitio de donde se extrae material de construcción, si bien, a veces, su estabilidad es cuestionable. (Correa, 2021)

**Zonas de Disposición de Materiales de Excavación Sobrantes.** Los ZODMES son sitios de disposición permanente de este tipo de materiales. Los cuales deben seleccionarse teniendo en cuenta los criterios económicos, geológicos, geotécnicos y socio ambientales. (Correa Arroyave , Guía Metodologica para la utilizacion de los materiales MERI-T, 2021)

**Los residuos de Construcción y Demolición.** (RCD) como aquellos residuos sólidos provenientes de las actividades de excavación, construcción, demolición, reparaciones o mejoras locativas de obras civiles o de otras actividades conexas. (Correa, 2021)

## 8. Marco Normativo

Tabla 1-Normatividad legal vigente

<b>TÍTULO</b>	<b>AÑO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
INV E- 218 (INVIAS, INV E- 218)	2012	Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 1/2) por medio de la máquina de los ángeles
INV E- 213 (INVIAS, INV E- 213)	2012	Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino
Resolución 541 del Ministerio de ambiente (Ambiente)	1994	Por el cual se regula el cargue, descargue, transporte, almacenamiento y disposición final de escombros

## 9. Marco Geográfico

El corredor vial Villavicencio-Bogotá se comprende por 85,6 kilómetros, los cuales están divididos en dividida en tres sectores: Calzada existente (sector inicial), Nueva calzada-El Tablón – Chirajara (Sector medio) y nuevo corredor Chirajara – Fundadores (Sector final).

Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio



Nota. Latitud: 4° 9'46.60"N- Longitud: 73°42'21.70"O Adaptado de Google Earth (2023)

## 10. Metodología

Para la implementación del proyecto se efectuará una metodología de tipo mixta, ya que se desarrollará a partir de la observación, análisis e interpretación de las variables obtenidas se determinan algunas propiedades físicas y mecánicas obtenidas de los materiales de excavación.

Figura 2. Metodología del Proyecto



Tabla 2- Fase Inicial

Fase 1: Identificación de los materiales que se extraen en las obras de excavación de los túneles del corredor vial Chirajara - Fundadores.

- Revisión del Estado del Arte
- Recopilar información existente y llevar a cabo la extracción de material presente en la zona.
- Petrografía del material

Tabla 3-Fase Media

Fase 2: Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales extraídos.

- Realizar ensayos de laboratorio para conocer las propiedades una vez obtenido los materiales necesarios a utilizar en la investigación.

Tabla 4-Fase Final

Fase 3: Clasificación de los materiales extraídos según el uso que se debe implementar.

- Categorizar el tipo de material y las propiedades de acuerdo con la normativa vigente (Véase Marco Normativo).
- Análisis de los resultados obtenidos mediante la caracterización de las propiedades obtenidas de los MERI.

## 11. Desarrollo Metodológico

### 11.1. Fase 1: Identificación de los materiales que se extraen en las obras de excavación de los túneles del corredor vial Chirajara – Fundadores

Para el desarrollo de esta fase se hizo una revisión del estado del arte, ensayos e identificación de la zona de estudio.

#### 11.1.1 Revisión del Estado del Arte

Se recopiló la información afín al proyecto con el fin de identificar las diversas metodologías usadas en materiales MERI-T, los ensayos a realizar y por ende las brechas de otras investigaciones.

Figura 3- Repositorio Institucional USTA



#### 11.1.2 Recopilar información existente y llevar a cabo la extracción de material presente en la zona

Se llevo a cabo una entrevista semiestructurada dirigida al personal COVIANDINA para conocer acerca del uso de los materiales MERI, específicamente se realizó un acercamiento con el Ing. Juan David Téllez Supervisor de obra de la obra corredor vial Villavicencio -Bogotá con el fin de conocer acerca de los estudios pertinentes que se han llevado a cabo en el corredor Chirajara-Fundadores y los lugares de disposición de residuos.

Una vez se obtuvo dicha información, se realizó la extracción y selección de los materiales MERI del túnel ubicado en el tercio final ZODME 4 del proyecto de la doble calzada Chirajara – Fundadores K77+000 de la vía Bogotá – Villavicencio. Dicha visita nos da como resultado la extracción de 500Kg de material rocoso, el cual es seleccionado de manera

minuciosa, teniendo en cuenta que gran parte ya se encontraba cubierto de una leve capa vegetal, por lo tanto, se escogen rocas que no presenten materia vegetal y lograr resultados óptimos.

Figura 4-Anexos recolección de muestras



### 11.1.3 Petrografía del Material

El análisis petrográfico permite determinar la composición mineralógica, la forma de las partículas, el grado de meteorización, la porosidad y los contaminantes de los agregados pétreos con el fin de determinar minerales química y volumétricamente inestables que afecten el desempeño del material. Es por eso que las rocas extraídas del Túnel Chirajara-Fundadores fueron evaluadas para así determinar el tipo de roca, su composición y textura. Para el análisis microscópico se seleccionó la parte del material mas significativo, donde se realiza un corte transversal

Tabla 5- Procedimiento Petrografía

<b>PROCEDIMIENTO PETROGRAFÍA</b>	
Muestra	Pulido con abrasivo #320, #600 y #1000
Trituración	Pegado final
Impregnación.	Desbaste con disco de diamante
Pegado Provisional	Pulido con abrasivo #600 y #1000
Desbaste con disco de diamante	Petrografía

Inicialmente se obtiene la muestra, a las cuales se les inyecta una resina epoxica de color azul con el propósito de aumentar la cohesión, permitir un mejor manejo en la hechura de las secciones y facilitar el reconocimiento de la porosidad, los vacíos y las microfisuras presentes en la muestra. Por otro lado, el análisis microscopia óptica de luz polarizada permite la determinación de forma cuantitativa bastante precisa de la composición mineralógica de las rocas mediante el método de conteo de puntos.

El análisis macroscópico permite reconocer texturas, estructuras, color natural, colores de alteración, formas de los agregados, entre otras características físicas que son observables a escala de muestra de mano. Este análisis se lleva a cabo con ayuda del estereomicroscopio modelo SMZ-161-TLED(R2LED) de la marca MOTIC.

*Figura 5- Fotografía del agregado bajo el estereomicroscopio.*

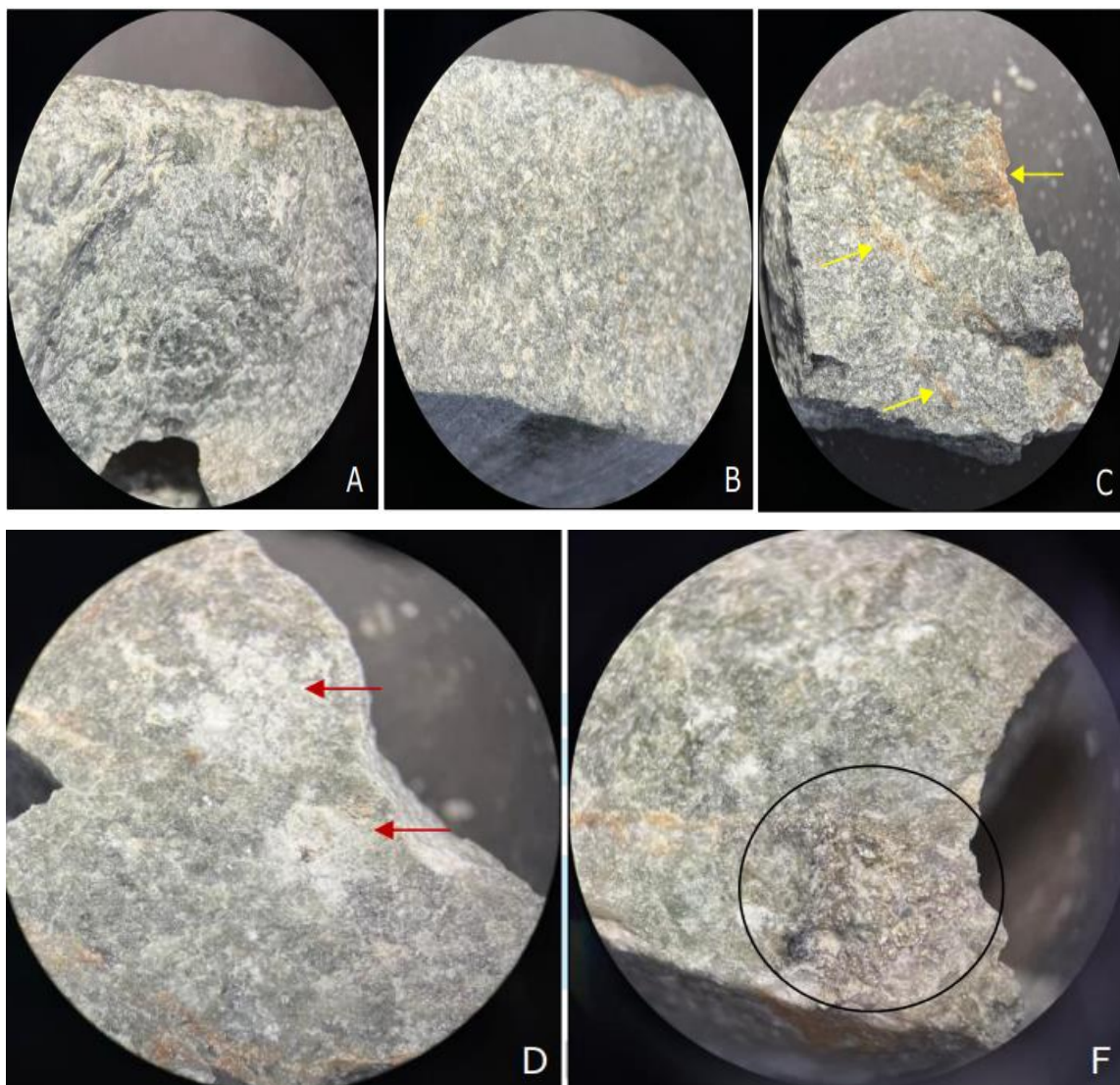


Tabla 6- Resultados Petrografía

<b>Tipo de Roca</b>	<b>Composición Mineralógica</b>	<b>Textura</b>
Gneis	Feldespatos, Cuarzo, Mica	Granular, Foliar
Esquisto	Arcilla, Mica, Feldespatos	Laminar, Foliado
Caliza	Calcita	Masiva
Anfibolita	Anfibol, Plagioclasa	Granular

En su totalidad, el agregado pétreo analizado está constituido por rocas ígneas de origen intrusivo, de composición félsica, clasificadas como granitoides ricos en cuarzo, las cuales presentan resistencia muy buena y su color característico es gris verdoso.

## 11.2. Fase 2: Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales extraídos

### 11.2.1 Desgaste de los Materiales

- Este método se refiere al procedimiento a seguir para medir la resistencia a la degradación de los agregados gruesos, como resultado de una combinación de acciones que incluyen abrasión, impacto y molienda en un tambor de acero rotatorio que contiene un número determinado de esferas metálicas, el cual depende de la granulometría de la muestra de ensayo.

Tabla 7- Definición de la Granulometría del Material

<b>TAMAÑO DEL CEDAZO</b>		<b>ASTM C 131</b>			
<b>PASA</b>	<b>RETENIDO</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
3"	2 1/2 "				
2 1/2 "	2"				
2"	1 1/2 "				
1 1/2 "	1"	1250+-25			
1"	3/4"	1250+-25			
3/4"	1/2"	1250+-25	2500+-10		
1/2"	3/8"	1250+-25	2500+-10		
3/8"	1/4"			2500+-10	
1/4"	N°4			2500+-10	
N°4	N°8				5000+-10
<b>TOTAL PESO (g)</b>		5000+-10	5000+-10	5000+-10	5000+-10
<b>N° DE ESFERAS</b>		12	11	8	6
<b>REVOLUCIONES</b>		500			

Figura 6-Granulometria



Se dispone del material anteriormente clasificado, realizando prueba de determinación de resistencia de agregados de fragmentación.

2. Consiste en un cilindro hueco de acero, cerrado en ambos extremos, con una longitud interior de  $508 \pm 5$  mm ( $20 \pm 0.2$ " ) y un diámetro interior, de  $711 \pm 5$  mm ( $28 \pm 0.2$ " ), fabricado con una placa de acero de espesor no menor de 12.4 mm. Figura 8
3. Se diferencia mediante la tabla ASTM C131 que tipo de material es, ver Tabla 7
4. Se determina que la granulometría del material obtenido es de tipo A, puesto que la mayor cantidad de material quedo retenido en los tamices de 1" a 3/8".
5. Se realiza un nuevo tamizado, con el fin de realizar prueba de desgaste. la máquina debe ser accionada y contrabalaceada en forma tal, que mantenga la velocidad periférica básicamente uniforme. Si se utiliza un perfil angular como pestaña, el sentido de rotación debe ser tal, que la carga se recoja sobre la superficie exterior del perfil.
6. Teniendo en cuenta que el material es de tipo A, la prueba se realizara con 12 bolas.
7. Luego de comprobar que el tambor este limpio, la muestra y la carga abrasiva correspondiente se colocan en la máquina de los Ángeles y se hace girar el tambor a una velocidad comprendida entre 188 y 208 rad/minuto (30 y 33 rpm) hasta completar 500 revoluciones El material extraído se pesa y se le resta el peso del tazón que lo contiene.
8. Se procede a lavar y se ingresa en el horno por 2h a un temperatura de  $110^{\circ}\text{C}$ , Si el agregado está libre de costras o de polvo se puede eliminar la exigencia de lavarlo antes y después del ensayo. La eliminación del lavado posterior, rara vez reducirá la pérdida medida en más del 0.2 % del peso de la muestra original. Sin embargo, en el caso de ensayos con fines de referencia o de arbitraje, el procedimiento de lavado es perentorio
9. Se aplica la fórmula de porcentaje de perdidas, el resultado del ensayo es la diferencia entre la masa original y la masa final de la muestra ensayada, expresada como tanto por ciento de la masa original. Figura 7

Figura 7 Ecuación Porcentaje de Perdidas

$$\% \text{ perdida} = \frac{M_o - M_f}{M_o} * 100$$

$$\% \text{ perdida} = \frac{5000g - 4250g}{5000g} * 100$$

$$\% \text{ perdida} = 15\%$$

Figura 8-Resultados Maquina de los Ángeles



### **11.2.2 Resistencia del Material**

**11.2.2.1. Extracción de núcleos.** Para la extracción del material rocoso recolectado, se utilizó el extractor de Núcleos o saca núcleos Orange Hilti DD130" (Figura 9) con el fin de obtener las muestras de cilindros, una vez obtenido, se espera someterlos a la prueba de resistencia de compresión con una broca diamantada para concreto de 4.3/4x400.

*Figura 9-Extracción de núcleos*



Luego de alinear el extractor de núcleos y verificar que todos sus componentes funcionen, se procede a realizar la extracción del material, el cual se tornó compleja debido a que la roca no es uniformemente plana, donde se tuvieron que realizar cortes a 45° y 90°, con la finalidad de obtener cilindros superiores a 5cm de altura, con el fin de preservar una mayor resistencia al momento de someterlos a fallo.

### **11.2.3 Ensayo a compresión uniaxial**

Una vez extraído el material, se observa que no es uniformemente plano, donde se lleva a realizar un procedimiento de desgaste mediante un torno y un buril de tungsteno, utilizado normalmente para elementos en concreto, en nuestro caso roca que se asemeja este tipo de material, con el fin de tener caras uniformemente planas, con el fin de poder llegar al fallo de la manera más óptima posible.

Figura 10- Desgaste de especímenes



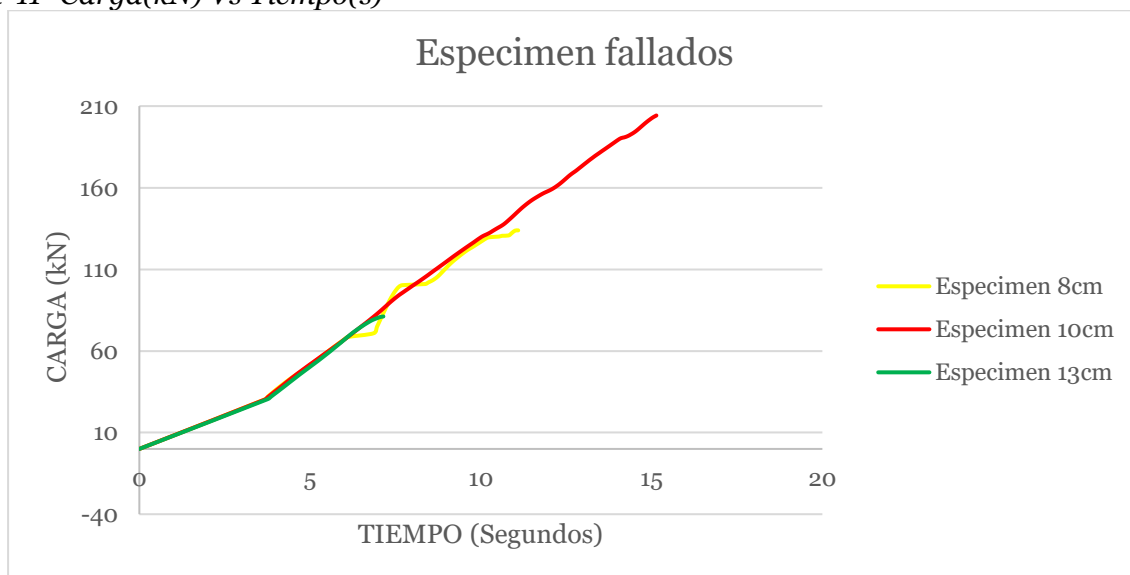
Se obtienen 9 especímenes de la roca a evaluar, donde sus medidas fueron las siguientes, dichos datos se contemplan para realizar prueba a compresión.

Tabla 8- Medida de especímenes

<b>DIAMETRO</b>	7	7	7	7	7	7	7	7	7
<b>ALTURA</b>	8	8	8	10	10	10	13	13	13

Se dispone de las muestras en forma cilíndrica para someterlas a fallos a compresión, donde se obtuvieron distintos resultados. Teniendo en cuenta la variación mínima se tabulo y se optó por un valor exacto en cada espécimen, dejando como resultado tres especímenes graficados, en el eje X tiempo y en el eje Y carga.

Figura 11- Carga(kN) Vs Tiempo(s)



Mediante la gráfica Carga vs Tiempo se observa que el espécimen que más resistió a compresión es el de 10cm, su falla fue a los 15 segundos, soportando una carga de 204.26 kN. Una vez realizado el sometimiento a cargas se toma como referencia las propiedades físicas y mecánicas de diversas rocas, donde la petrografía analizada en este trabajo de grado nos deja como evidencia que el tipo de roca a tratar es una dacita.

Tabla 9- Propiedades físicas y mecánicas de diversas rocas

ROCAS	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	MÓDULO DE YOUNG (GPa)	COEFICIENTE DE POISSON	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (Mpa)	RESISTENCIA A TRACCIÓN (Mpa)	RESISTENCIA A FLEXIÓN (Mpa)
<b>Rocas Batolíticas</b>						
Granito granodiorita	2500-2750	30-70	0,12-0,25	0,1-2	120-280	4-7
Gabro	2920-3050	60-100	0,12-0,25	2-5	150-200	5-8
<b>Rocas Extrusivas</b>						
Riolitas	2450-2600	10-20	0,1-0,2	0,4-4	80-160	5-9
Dacita	2500-2750	8-18	0,09-0,2	0,5-5	80-160	3-8
Andesita	2300-2750	12-35	0,11-0,2	0,2-8	40-320	5-11
Basalto	2750-3000	20-100	0,14-0,2	0,2-1,5	30-420	6-12
Diabasa	2900-3100	30-90	0,12-0,2	0,3-0,7	120-250	6-13
Tobas Volcanicas	1300-2200	-----	0,1-0,2	8-35	5-60	0,5-4,5
<b>Rocas sedimentarias</b>						
Arenisca	2100-2500	15-17	0,07-0,12	1-8	10-120	1,5-6
Caliza de grano fino	2600-2850	50-80	0,1-0,2	0,1-0,8	50-200	4-7
Caliza de grano grues	1550-2300	-----	0,12	2-16	4-60	1-3,5
Caliza	1550-2500	-----	0,07-0,12	1,5-6	49-200	1,5-5
Dolomita	2200-2700	20-30	0,08-0,2	0,2-4	15-200	2,5-6
Esquistos	2450-2750	-----	-----	0,2-0,4	-----	-----
<b>Rocas metamórficas</b>						
Mármol	2650-2750	60-90	0,11-0,2	0,1-0,5	50-180	5-8
Gneis	2600-2780	25-60	0,09-0,2	1-5	80-250	4-7

De acuerdo con los resultados obtenidos en la petrografía y basados en la literatura, el tipo de roca que tratamos hace referencia a una dacita, contemplando los equipos de laboratorios con los que cuenta la Universidad Santo Tomas sede Villavicencio, se realizaron dos tipos de pruebas nombradas en la tabla del libro mecánica de rocas, fundamentos e ingeniería de taludes (propiedades físicas y mecánicas de diversas rocas)

Tabla 10-Densidad-Espécimen 8cm (Kg/m<sup>3</sup>)

<b>DENSIDAD - 8 CM DE ALTURA</b>		
Masa	1,2	Kg
Volumen	1231,50432	cm <sup>3</sup>
Volumen	0,001231504	m <sup>3</sup>
Diámetro	7	cm
Altura	8	cm
Área	153,93804	cm <sup>2</sup>
P = M/V	974,4180189	Kg/m <sup>3</sup>

Tabla 11 Densidad-Espécimen 10 cm (Kg/m<sup>3</sup>)

<b>DENSIDAD - 10 CM DE ALTURA</b>		
Masa	1,3	Kg
Volumen	1539,3804	cm <sup>3</sup>
Volumen	0,00153938	m <sup>3</sup>
Diámetro	7	cm
Altura	10	cm
Área	153,93804	cm <sup>2</sup>
$P = M/V$	844,495616	Kg/m <sup>3</sup>

Tabla 12 Densidad- Espécimen 13 cm (Kg/m<sup>3</sup>)

<b>DENSIDAD - 13 CM DE ALTURA</b>		
Masa	1,5	Kg
Volumen	2001,19452	cm <sup>3</sup>
Volumen	0,00200119	m <sup>3</sup>
Diámetro	7	cm
Altura	13	cm
Área	153,93804	cm <sup>2</sup>
$P = M/V$	749,552322	Kg/m <sup>3</sup>

**RESISTENCIA A COMPRESIÓN (Mpa)**

Mediante el proceso de compresión se utilizó la maquina universal, alcanzando fallos para determinar la capacidad portante del material a evaluar, en este caso roca de tipo dacita, los resultados a observar se encuentra en las siguientes tablas.

Tabla 13 Compresión espécimen 8 cm

<b>COMPRESIÓN ESPÉCIMEN 8CM</b>		
Carga	133	kN
Carga	133000	N
Área	153,93804	cm <sup>2</sup>
Área	15393,804	mm <sup>2</sup>
Área	0,0153938	m <sup>2</sup>
Esfuerzo	8639,83977	Kn/m <sup>2</sup>
Esfuerzo	8639,83977	Kpa
Esfuerzo	8,63983977	Mpa
Esfuerzo	8,640	Mpa

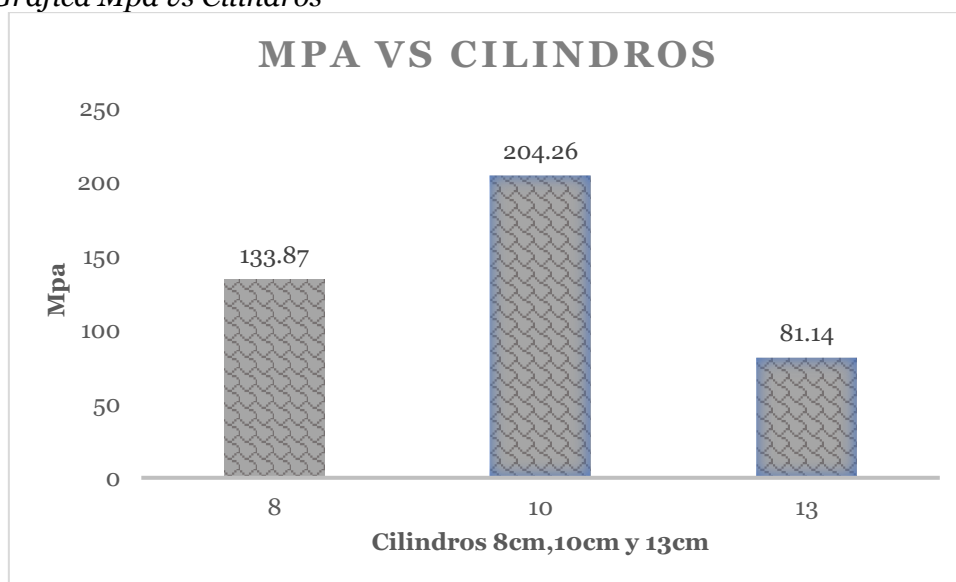
Tabla 14 Compresión espécimen 10cm

COMPRESIÓN ESPECIMEN 10CM		
Carga	204	kN
Carga	204000	N
Área	153,93804	cm <sup>2</sup>
Área	15393,804	mm <sup>2</sup>
Área	0,0153938	m <sup>2</sup>
Esfuerzo	13252,0851	Kn/m <sup>2</sup>
Esfuerzo	13252,0851	Kpa
Esfuerzo	13,2520851	Mpa
Esfuerzo	13,252	Mpa

Tabla 15 Compresión espécimen 13 cm

COMPRESIÓN ESPECIMEN 13CM		
Carga	81	kN
Carga	81000	N
Área	153,93804	cm <sup>2</sup>
Área	15393,804	mm <sup>2</sup>
Área	0,0153938	m <sup>2</sup>
Esfuerzo	5261,8573	Kn/m <sup>2</sup>
Esfuerzo	5261,8573	Kpa
Esfuerzo	5,2618573	Mpa
Esfuerzo	5,262	Mpa

Figura 12- Gráfica Mpa vs Cilindros

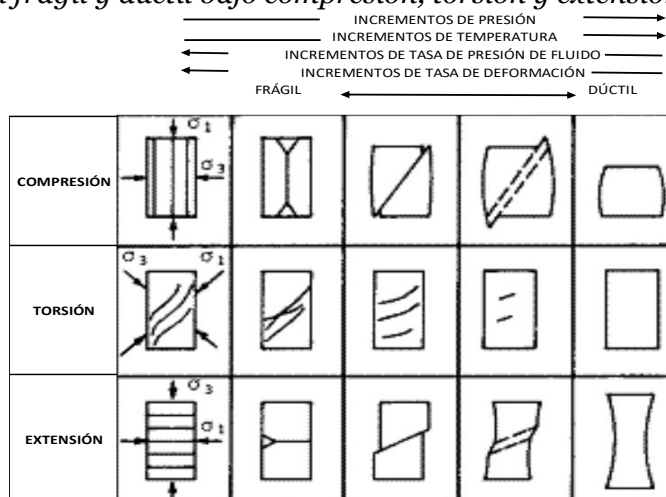


**Tipo de falla en resistencia a la compresión de cilindros.**

La resistencia a la compresión, se conoce como la carga en kN por unidad de área a la que el material falla, nuestro caso, roca de tipo dacita, clasificada en nueve especímenes de 8cm,10cm y 13cm, como finalidad de este ensayo, se obtuvo una serie de rupturas en el

espécimen tipo cilindro , esta propiedad es muy importante debido a que el material antes mencionado y extraído del ZODME 4 corredor vial Chirajara – Fundadores, no se le conoce registro bibliográfico que mida su resistencia a la compresión en una prensa hidráulica, es importante recalcar que los resultados obtenidos dependen mucho de la forma y el tamaño del cilindro.

Figura 13 Deformación frágil y dúctil bajo compresión, torsión y extensión

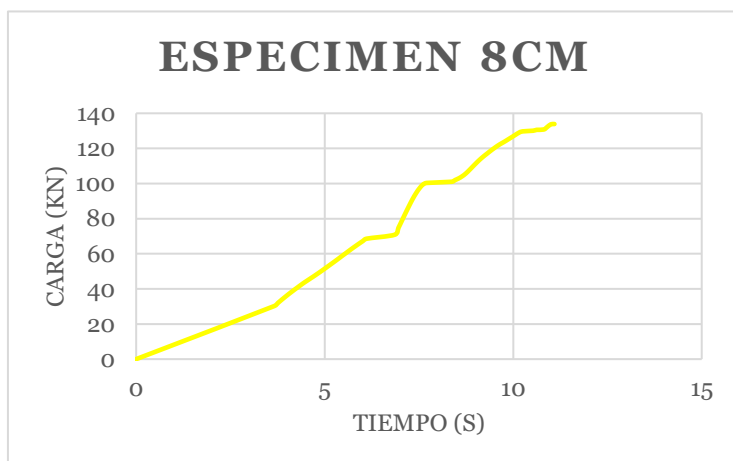


(Universidad de Granada, 2020)

### Clasificación de tipo de falla

Cilindro de 8cm sometido a compresión, el cual presenta falla catalogada como dúctil.

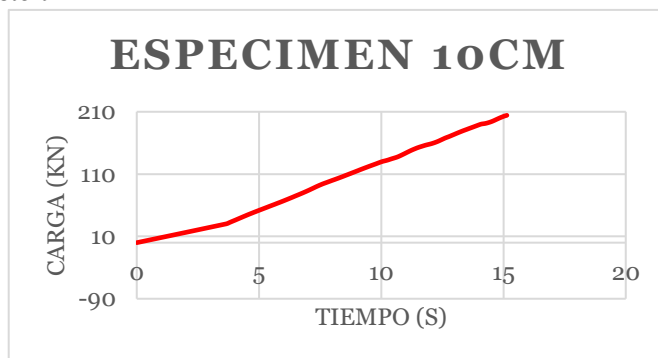
Figura 14- Cilindro 8cm sometido a compresión



Cilindro de 10cm sometido a compresión, el cual

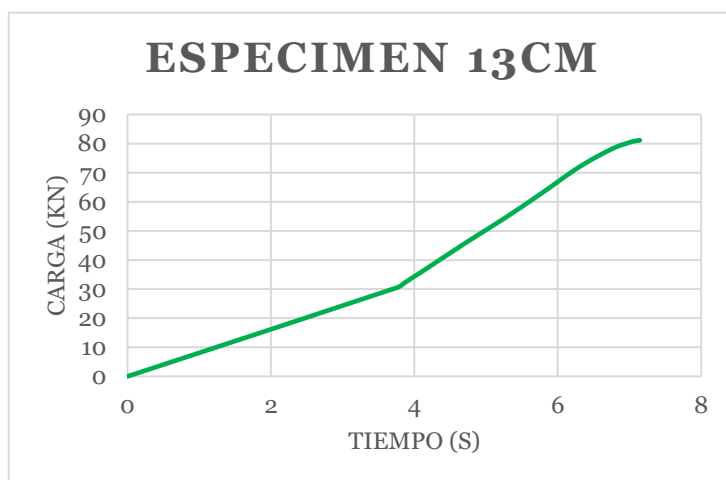
presenta falla catalogada como frágil.

Figura 15 Cilindro de 10cm sometido a compresión



Cilindro de 13cm sometido a compresión, el cual presenta falla catalogada como dúctil.

Figura 16 Cilindro de 13cm sometido a compresión



**11.2.4 Fase 3: Clasificación de los materiales extraídos según el uso que se debe implementar.**

**11.2.4.1. Análisis de resultados.** La prueba de desgaste del material triturado determina que tenemos un agregado reutilizable, con un porcentaje de pérdida del 15% se estima que su uso en construcción de vías, gaviones, terraplenes si es favorable, su reutilización sería adecuada.

Las deformaciones obtenidas en la prueba a compresión determinaron un material altamente resistente, donde las fallas que se obtuvieron fueron frágiles y dúctiles. Debido al proceso de obtención del material con el extractor de núcleos algunos especímenes en su interior ya venían fracturados, porosos o con algún tipo de anomalía, sin embargo, el resultado obtenido especifica que el espécimen que más carga soporto fue el de 10cm.

## **12. Resultados e Impacto**

Los resultados esperados de gran impacto que puede tener esta investigación, trascendentalmente se miraran reflejados con el pasar del tiempo, cuando disminuya la explotación de recursos naturales para satisfacer una necesidad, en este caso la construcción de túneles, dando aprovechamiento a los MERI T luego de haber pasado por un proceso de investigación, identificación y clasificación de los mismos para así poder dar su respectivo uso, sustituyendo el material de relleno que se extrae en las fuentes hídricas o minas, no obstante aprovechando del todo los materiales que normalmente son desechados en escombreras como el balastro, ayudándole a tener mayor resistencia a los MERI T.

### **13. Conclusiones**

La clasificación de los materiales MERI- T se llevó a cabo luego de la investigación y análisis, logrando entender que dicho material extraído del ZODME 4 K77+000 es un agregado de valor significativo para la construcción. El estudio petrográfico nos arrojó un material de origen ígneo altamente rico en cuarzo, donde el equipo altamente calificado de la universidad santo tomas determino que se trataba de una roca tipo dacita.

El ensayo de laboratorio de máquina de los ángeles, arrojó un resultado significativo para lo que puede ser un antes y un después para la reutilización del material de excavación en uso industrial, contemplando que luego de la clasificación se obtuvo un material de tipo A con un desgaste del 15%.

Basado en los resultados obtenidos, el material triturado extraído de la excavación de los túneles Chirajara – fundadores, se puede utilizar a mayor escala en la construcción de vías terciarias como base y subbase

No obstante, contemplando que el material no clasificado debido a su gran tamaño, si puede tener uso, debido a que los especímenes en la prueba a compresión alcanzaron una gran resistencia en comparación a rocas sedimentarias, dicho material altamente resistente se puede implementar en el uso de gaviones

## 14. Bibliografía

- Alvaro, C. A. (01 de 06 de 2020). *Utilización de los materiales MERI-T (Materiales de Excavación de Reutilización Industrial) producidos durante la excavación de un túnel vial*. Obtenido de Suelos y Pavimentos Gregorio Rojas & CIA LTDA: <https://suelosypavimentos.com.co/utilizacion-de-los-materiales-meri-t-materiales-de-excavacion-de-reutilizacion-industrial-producidos-durante-la-excavacion-de-un-tunel-vial/>
- Bastidas Barranco , M. J., & Jiménez Fuentes , Y. (26 de 09 de 2017). *Optimización de materiales de excavación de reutilización industrial (meri) de la mina de carbón “cerrolargo” para la estabilización de suelos en el desarrollo de infraestructura vial mediante algoritmos evolutivos multiobjetivo (aemo)*. [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/9167?show=full>
- Correa Arroyave Alvaro. (2021). *Materiales de excavación de reutilización industrial producidos*. Sociedad Colombiana De Ingenieros, 1-9.
- Instituto Nacional de Vías (Invias). (2012). Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles INV E – 218 – 13: <https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-218-13.pdf>
- Instituto Nacional de Vías (Invias). (2012). Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino : <https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-213-13.pdf>
- Ministerio Del Medio Ambiente. (14 de 12 de 1994). *Resolución 541 de 1994. Por medio de la cual se regula el cargue, descargue, transporte, almacenamiento y disposición final de escombros, materiales, elementos, concretos y agregados sueltos, de construcción, de demolición y capa orgánica, suelo y subsuelo de excavación* [https://www.anla.gov.co/documentos/normativa/resoluciones/res\\_0541\\_141294.pdf](https://www.anla.gov.co/documentos/normativa/resoluciones/res_0541_141294.pdf)
- Raúl Velásquez José. (31 de 07 de 2020). *Desechos mineros se convertirían en materiales de construcción*. Universidad Nacional de Colombia: <https://minas.medellin.unal.edu.co/noticias/facultad/3277-desechos-mineros-se-convertirian-en-materiales-de-construccion>
- Schayan Janet. (02 de 11 de 2023). *Deutschland*. Obtenido de Reinención de la antigua región carbonera: <https://www.deutschland.de/es/topic/economia/cuenca-del-ruhr-transformacion-de-la-region-carbonera>
- Suárez-Silgado, S. S., Betancourt Quiroga, C., Molina Benavides, J., & Mahecha Vanegas, L. (2019). La gestión de los residuos de construcción y demolición en Villavicencio:

estado actual, barreras e instrumentos de gestión. *Entramado*, 15(1), 224–244.  
<https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.5408>

Universidad de Granada. (13 de 02 de 2020). *Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales*. Obtenido de Propiedades de las Rocas de Construcción y Ornamentación:  
<https://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA05.htm>

Vidal Rainho Caroline. (02 de 2015). *Universidad de Coruña*. Obtenido de Escola Universitaria de Arquitectura Técnica:  
[https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/14184/VidalRainho\\_Caroline\\_TFG\\_2015.pdf?sequence=2](https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/14184/VidalRainho_Caroline_TFG_2015.pdf?sequence=2)