

VIABILIDAD Y APLICABILIDAD DE LOS MATERIALES MERI EN PROYECTOS DE  
INGENIERÍA CIVIL, CASO CARRETERA BOGOTÁ – VILLAVICENCIO, TRAMO  
CHIRAJARA – FUNDADORES.



ANGIE JULIANA ISAIRIAS MONTOYA  
LESLY DANIELA HERNÁNDEZ ROJAS



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
VILLAVICENCIO

2023

VIABILIDAD Y APLICABILIDAD DE LOS MATERIALES MERI EN PROYECTOS  
DE INGENIERÍA CIVIL.

ANGIE JULIANA ISAIRIAS MONTOYA  
LESLY DANIELA HERNÁNDEZ ROJAS

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

Asesor

I.C. JUAN MANUEL SALGADO DÍAZ, MSc.

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
VILLAVICENCIO

2023

**Autoridades Académicas**

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

Rector General

**P. Eduardo GONZÁLEZ GIL, O. P.**

Vicerrector Académico General

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

Rector Seccional Villavicencio

**P. Rodrigo GARCÍA JARA, O. P.**

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

**Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN**

Secretaria de División Sede Villavicencio

**Ing. LUIS FERNANDO DÍAZ CRUZ**

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo especialmente a Dios y a mi madre que está en el cielo, a mis padres, quienes siempre han sido mi fuente inagotable de apoyo y motivación. A mi familia, por comprender las largas horas de estudio y por ser mi refugio en los momentos difíciles. A mis amigos y colegas, por compartir conmigo esta travesía académica y por ser fuente constante de inspiración. A mis profesores, cuya sabiduría y orientación han guiado mi camino hacia el conocimiento. A todos aquellos que de alguna manera contribuyeron a la culminación de este proyecto, les dedico mi más profundo agradecimiento. Este logro no es solo mío, sino de todos aquellos que han formado parte de mi viaje académico y personal.

*Juliana Isairias*

El presente trabajo de grado se lo dedicó primeramente a Dios y a mis padres, quienes me apoyaron incansablemente durante mi carrera y el tiempo que tomo la investigación, personas llenas de amor y orgullo para conmigo que solo me han impulsado a creer en mí y a terminar mis proyectos, a mis hermanos, por estar pendientes de mi proceso y su apoyo incondicional. A mis profesores, que, además de ser excelentes profesionales, también, son excelentes personas, llenas de gracia y entendimiento para con sus estudiantes, orientándonos siempre y enriqueciéndonos de conocimiento. A mis amigos y todos aquellos quienes pusieron su granito de arena en este camino, me siento muy orgullosa de haber atravesado por esta etapa de mi vida rodeada de tan maravillosas personas. A mí misma por ser capaz, por entenderme y por luchar y no desfallecer por mis sueños hasta llegar a la meta.

*Daniela Hernández*

### **Agradecimientos**

Quiero empezar agradeciéndole a Dios, sin el nada de esto hubiese sido posible. Gracias a todo el personal de la Universidad Santo Tomas, quienes me brindaron los espacios para recibir una formación integra y concluir con mi proyecto de grado de investigación contando con todas las herramientas y medios necesarios.

Infinitas gracias al ingeniero Juan Manuel Salgado Díaz, por su paciencia, por su apoyo incondicional, por brindarnos las herramientas, por su guía experta a lo largo de este proyecto. Su dedicación y conocimientos fueron fundamentales para el éxito de esta investigación.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a mis padres, quienes me apoyaron incansablemente durante mi carrera y el tiempo que tomo la investigación, personas llenas de amor y orgullo para conmigo que solo me han impulsado a creer en mí y a terminar mis proyectos, a mis hermanos, por estar pendientes de mi proceso y su apoyo incondicional, a mis compañeros y colegas por las largas jornadas de estudio, por la complicidad y por la amistad que se formó para toda la vida y, finalmente, me agradezco a mí misma, por ser capaz, por entenderme y por luchar y no desfallecer por mis sueños hasta llegar a la meta.

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Resumen .....	12
Abstract.....	13
Glosario.....	14
Introducción.....	15
1. Formulación del problema.....	17
1.1. Pregunta de investigación.....	17
2. Objetivos .....	18
2.1. Objetivo general .....	18
2.2. Objetivos específicos.....	18
3. Justificación.....	19
4. Alcance .....	20
5. Estado del arte .....	21
6. Marco teórico .....	23
7. Marco conceptual .....	25
Materiales MERI:.....	25
Granulometría.....	25
Viabilidad .....	26
Resistencia a la compresión .....	26
Evaluación de la aplicabilidad de los materiales MERI.....	26
8. Marco geográfico .....	27
9. Marco normativo .....	28
10. Desarrollo de la metodología empleada.....	29
10.1. Recolección de la muestra .....	29
10.2. Petrografía .....	30
10.2.1 Fotografía del agregado bajo el esteromicroscopio. ....	30
10.2.2 Microfotografías del agregado de granitoide rico en cuarzo en objetivo 5X. ....	31
10.2.3 Microfotografías del agregado de granitoide rico en cuarzo en objetivo 8X. ....	32
10.3. Extracción de núcleos .....	33

10.4.	Evaluar la viabilidad técnica y la mejora en las propiedades del pavimento rígido al sustituir el material común de 3/4 por material 3/4 proveniente de MERI.....	34
10.4.1	Caracterización de Materiales:.....	34
10.5.	Diseño de mezcla, concreto 21 MPa .....	40
10.5.1	Preparación de Mezclas y Elaboración de Cilindros: .....	40
10.5.2	Ensayos de Laboratorio: .....	45
10.5.3	Fallas y graficas .....	45
11.	Resultados .....	58
11.1.	Análisis por resistencia respecto a los días de curado .....	58
11.2.	Comparación norma .....	59
11.3.	Módulo de rotura viguetas .....	60
11.4.	Análisis por tipología de falla.....	62
12.	Conclusiones .....	66
13.	Recomendaciones .....	67
14.	Bibliografía .....	68

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> <i>Marco Normativo</i> .....	28
<b>Tabla 2</b> <i>Constituyentes de la roca</i> .....	30
<b>Tabla 3</b> <i>Minerales en la roca</i> .....	33
<b>Tabla 4</b> <i>Cantidad concreto 1:2:3 (1 m<sup>3</sup>)</i> .....	41
<b>Tabla 5</b> <i>Volumen de probetas</i> .....	41
<b>Tabla 6</b> <i>Volumen necesario de concreto</i> .....	42
<b>Tabla 7</b> <i>Análisis día 7</i> .....	58
<b>Tabla 8</b> <i>Análisis día 14</i> .....	58
<b>Tabla 9</b> <i>Análisis día 28</i> .....	58
<b>Tabla 10</b> <i>Comparación norma</i> .....	59
<b>Tabla 11</b> <i>Datos para determinar el módulo de rotura</i> .....	61
<b>Tabla 12</b> <i>Datos módulo de rotura vigueta</i> .....	61
<b>Tabla 13</b> <i>Tipo de falla representativa en los ensayos</i> .....	64

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> <i>Marco geográfico</i> .....	27
<b>Figura 2</b> <i>Recolección de la muestra</i> .....	29
<b>Figura 3</b> <i>Fotografías esteromicroscopio</i> .....	31
<b>Figura 4</b> <i>Microfotografías 5X</i> .....	32
<b>Figura 5</b> <i>Microfotografías 8X</i> .....	32
<b>Figura 6</b> <i>Extracción de Núcleos</i> .....	34
<b>Figura 7</b> <i>Cuarzo en la roca</i> .....	35
<b>Figura 8</b> <i>Plagioclasa en la roca</i> .....	36
<b>Figura 9</b> <i>Feldespató potásico en la roca</i> .....	37
<b>Figura 10</b> <i>Micas en la roca</i> .....	37
<b>Figura 11</b> <i>Calcita en la roca</i> .....	38
<b>Figura 12</b> <i>Zircón en la roca</i> .....	38
<b>Figura 13</b> <i>Forma de los agregados</i> .....	39
<b>Figura 14</b> <i>Tamizado 3/4</i> .....	40
<b>Figura 15</b> <i>Mezcla de concreto</i> .....	42
<b>Figura 16</b> <i>Prueba de cono Abrams</i> .....	43
<b>Figura 17</b> <i>Encofrado de muestras de concreto</i> .....	44
<b>Figura 18</b> <i>Curado de cilindros y viguetas</i> .....	45
<b>Figura 19</b> <i>Muestras día 7</i> .....	46
<b>Figura 20</b> <i>Cilindro grande día 7</i> .....	46
<b>Figura 21</b> <i>Falla cilindro grande día 7</i> .....	47
<b>Figura 22</b> <i>Cilindro pequeño día 7</i> .....	47
<b>Figura 23</b> <i>Falla cilindro pequeño día 7</i> .....	48
<b>Figura 24</b> <i>Vigueta día 7</i> .....	49
<b>Figura 25</b> <i>Falla a flexión de vigueta de concreto</i> .....	49
<b>Figura 26</b> <i>Muestras día 14</i> .....	50
<b>Figura 27</b> <i>Cilindro grande día 14</i> .....	50

<b>Figura 28</b> <i>Falla cilindro grande día 14</i> .....	51
<b>Figura 29</b> <i>Cilindro pequeño día 14</i> .....	51
<b>Figura 30</b> <i>Falla cilindro pequeño día 14</i> .....	52
<b>Figura 31</b> <i>Vigueta día 14</i> .....	53
<b>Figura 32</b> <i>Falla vigueta día 14</i> .....	53
<b>Figura 33</b> <i>Muestras día 28</i> .....	54
<b>Figura 34</b> <i>Cilindro grande día 28</i> .....	54
<b>Figura 35</b> <i>Falla cilindro grande día 28</i> .....	55
<b>Figura 36</b> <i>Cilindro pequeño día 28</i> .....	55
<b>Figura 37</b> <i>Falla cilindro pequeño día 28</i> .....	56
<b>Figura 38</b> <i>Vigueta día 28</i> .....	57
<b>Figura 39</b> <i>Falla vigueta día 28</i> .....	57
<b>Figura 40</b> <i>Carga vs días de curado</i> .....	60
<b>Figura 41</b> <i>Módulo de rotura viguetas</i> .....	62
<b>Figura 42</b> <i>Tipo de fallas en cilindros</i> .....	63

**Lista de Ecuaciones**

	<b>Pag.</b>
<b>Ecuación 1</b> <i>Resistencia a compresión del concreto</i> .....	59
<b>Ecuación 2</b> <i>Módulo de rotura</i> .....	60

### **Resumen**

Tras una exhaustiva investigación y análisis, se concluye que la sustitución del material común por material 3/4 de MERI en mezclas de concreto para pavimento rígido ofrece resultados prometedores. Los ensayos de laboratorio revelaron mejoras significativas en resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y absorción de agua. La comparación con normativas de la ASTM respalda la viabilidad técnica de la implementación de MERI. Desde una perspectiva ambiental, la adopción de MERI reduce la dependencia de recursos naturales y fomenta prácticas sostenibles. Se recomienda la implementación gradual, monitoreo continuo, capacitación, investigación adicional y colaboración interinstitucional para optimizar la adopción de MERI.

***Palabras Clave:*** Material 3/4 MERI, Pavimento Rígido, Sustitución de Materiales, Resistencia a la compresión, Practicas Sostenibles.

### **Abstract**

*After conducting comprehensive research and analysis, the substitution of conventional materials with 3/4 MERI in rigid pavement concrete mixes demonstrates considerable promise. Laboratory tests have unveiled substantial enhancements in compressive strength, modulus of elasticity, and water absorption. Comparison with ASTM standards substantiates the technical viability of incorporating MERI. From an environmental standpoint, the adoption of MERI diminishes dependence on natural resources, thereby fostering sustainability. To optimize the integration of MERI, it is recommended to proceed with gradual implementation, sustained monitoring, training initiatives, additional research, and fostering interinstitutional collaboration.*

**Key Word-** 3/4 MERI Material, Rigid Pavement, Material Replacement, Compressive Strength, Sustainable Practices.

## Glosario

**MATERIAL MERI:** Hace referencia a 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

**REUTILIZACIÓN:** Es la acción que permite volver a utilizar los bienes o productos desechados, denominados residuo (p. ej. residuos sólidos urbanos), y darles un uso igual o diferente a aquel para el que fueron concebidos.

**RESISTENCIA:** Se encarga de estudiar el efecto de las fuerzas sobre los cuerpos deformables. En este sentido, sí es necesario tener en cuenta parámetros que dependan de cada tipo de material.

**VIABILIDAD:** Es el estudio que dispone el éxito o fracaso de un proyecto a partir de una serie de datos base de naturaleza empírica: medio ambiente del proyecto.

**CARACTERIZACIÓN:** Cuando se habla de ciencia de materiales, hace referencia al proceso general y amplio por el cual la estructura de un material y sus propiedades son probadas y medidas.

**ENSAYOS:** Se determinan las características, ya sea físicas o químicas, del producto en análisis, bajo unos procedimientos determinados. Aunque este término suene muy lejano, los ensayos se usan constantemente en la producción y en la industria para asegurar que los productos sean de calidad.

**NORMAS ASTM:** Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales, por sus siglas en inglés, es una organización de estándares internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios.

## Introducción

Los materiales producto de la excavación de túneles, por su parte, han sido tratados tradicionalmente tanto en Colombia como en el resto del mundo, como materiales de poco valor y exceptuando un bajo porcentaje, que en términos generales no alcanza a sobrepasar el 25%, que son utilizados en el mismo proyecto para la producción de agregados para concretos y pavimentos, y alguna otra obra de protección de la misma vía, lo demás va al ZODME. Baste con observar las condiciones manifiestas en la estructuración de los proyectos en donde ni el constructor ni el propietario de la obra (el estado, en este caso demostrado por el INVÍAS o la ANI) hacen alusión a estos materiales; solo en los permisos ambientales se especifican sus intenciones, Son residuos tan de poco valor que en la bibliografía internacional se les denomina como residuos, desperdicio, lodo, EREM (material excavado de roca y tierra), marin (materiales de excavación), escombros, dechets, MATEX (materiales de excavación), escombros , residuos, desperdicios y sobrantes, entre otros. Todos estos apelativos experimentan confusión, pues su trasfondo es que se trata de materiales con poco o ningún valor.

Previa una buena caracterización que pueden variar tanto características físicas como mecánicas, químicas, mineralógicas, entre otras, puede dar el uso más adecuado a estos nobles productos de excavación.

Existen varias oportunidades para el uso del material excavado de los túneles. Como ejemplos se pueden describir:

- Terraplenes, fundaciones y vertederos
- Reconformación de terrenos
- Presas de tierra y roca
- Agregados para concretos y pavimentos asfálticos
- Material para subbase, pavimentos, balasto y construcción de la superestructura
- Protección de taludes, fuentes hídricas y procesos erosivos
- Muros de mampostería y gaviones

- Protección contra caída de rocas
- Preparación de sitios de construcción
- Relleno de áreas intervenidas por la extracción minera tales como pits y canteras
- Rehabilitación del paisaje.
- Construcción de parques de recreación pasiva para actividades familiares y aun para deportes como el bicigrós y los deportes de riesgo medio
- Vías de menores especificaciones
- Corrección de la acidez o alcalinidad de los suelos
- Material de relleno
- Rellenos sanitarios
- Jarillones

La posible utilización de los materiales de excavación, sobrepasar nuestra imaginación, pues de pasar de no utilizarlos (desecharlos en ZODMES o botaderos) pareciera ser el único uso posible disponible en las mismas necesidades del proyecto y aún en proyectos de infraestructura similares, olvidando de paso que se trata de buscar su uso más racional, el cual podría encontrar en otros problemas, incluido el uso medio ambiental del mismo, todo, previo un estudio minucioso que orienta hacia su uso más racional.

## **1. Formulación del problema**

Según datos de la Oficina Asesora de Planeación del Ministerio de Transporte, Colombia cuenta con una red vial aproximada de 128.507 km, de los cuales 11.463 km (8,9%) son de la red primaria a cargo del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS), 5680 km (4%) concesionados a cargo de la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), 36.618 km (28,6%) corresponde a la red departamental o secundaria y 34.918 km (27,2%) a la municipal; 27.577 (21,5%) de vías terciarias a cargo del INVÍAS (antes Caminos Vecinales) y 12251 (9,5%) sin clasificar. Colombia es uno de los países con menor número de kilómetros de carreteras por cada mil habitantes, (menos de 1km) superado por países como Perú y Guatemala (1,1 km), Chile y Brasil (con cerca de 2,5 km), Venezuela (con 3,6 km) y también por Malasia y Argentina (con 5,2 km y 5,9 km, respectivamente). Bajo este escenario manifiesto, el país se podría decir que, dentro de la infraestructura productiva, la del transporte (en términos del número de kilómetros de vías pavimentadas) es la más rezagada. Ante esta situación planteada y la gran demanda de recursos y materiales que requieren los proyectos de construcción vial, se hace indispensable plantear alternativas que reduzcan los costos de construcción, operación y mantenimiento de las vías. Una de estas alternativas desde el punto de vista ambiental, económico, social, técnico y posiblemente tecnológico, es la que tiene que ver con la utilización de MERI procedentes de la exploración, extracción, tratamiento y almacenamiento de recursos minerales, considerados desechos y que por los volúmenes de disposición generan altas cargas contaminantes, los cuales podrían ser utilizados para la estabilización de suelos. Las operaciones mineras a gran escala producen inevitablemente grandes cantidades de MERI, sin embargo, estos no tienen ningún tipo de uso y actualmente se encuentran dispuestos en zonas de depósito; generando gran impacto ambiental, social y económico.

### **1.1. Pregunta de investigación**

¿Cómo emplear los materiales MERI de manera adecuada a las obras civiles?

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo general**

Evaluar la viabilidad y aplicabilidad de los materiales MERI en proyectos de ingeniería civil, teniendo en cuenta su desempeño técnico y su impacto ambiental.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Determinar las propiedades mecánicas de los materiales MERI, para evaluar su idoneidad en distintas aplicaciones de Ingeniería Civil.
- Comparar los resultados obtenidos de las pruebas con los requisitos establecidos por las normas vigentes para la fabricación de probetas de concreto, como las normas ASTM o las normativas locales.
- Evaluar si los materiales MERI cumplen con los requisitos de las normas para la fabricación de probetas de concreto, en términos de resistencia, durabilidad y propiedades físicas.

### **3. Justificación**

Las explotaciones mineras implican procesos de exploración, extracción, tratamiento y almacenamiento de recursos minerales, los cuales influyen considerablemente en el sitio donde se realizan. Estos procesos tienen una gran incidencia local, regional y nacional tanto en el ámbito social, económico como en el ambiental. En lo que respecta al departamento del Cesar, en los últimos años se han registrado cambios muy importantes principalmente en su economía, si se tiene en cuenta que, de acuerdo con las estimaciones del DANE, la minería pasó de representar el 8% del PIB en 1990 al 34% en 2005

Lo anterior debido al crecimiento de la minería y particularmente de la explotación de los yacimientos de carbón existentes. Estas explotaciones mineras producen grandes cantidades de MERI y por tanto es necesario considerar el manejo de estos grandes volúmenes de materiales de manera que puedan reducir al mínimo los impactos generados, en este orden de ideas, la presente investigación está orientada a caracterizar y optimizar mezclas de MERI, desarrollando una metodología basada en los fundamentos de los AEMO, con la cual se pueda obtener el mejor conjunto de posibles soluciones relacionadas con su utilización en la estabilización de suelos y que aún no han sido reportados como tal. Lo anterior, traerá beneficios sociales, económicos y ambientales a los pobladores de la región y permitirá el análisis y evaluación de otras formas de comercialización de nuevos productos procedentes de la gestión integral de MERI que sean potencialmente aprovechables para el mejoramiento de suelos, lo cual se reflejaría en la disminución de los costos de construcción, mejoramiento de las vías y reducción de MERI.

#### **4. Alcance**

Este proyecto de investigación de pregrado tiene como alcance evaluar la viabilidad y aplicabilidad de los materiales MERI en proyectos de Ingeniería Civil, considerando su desempeño técnico y su impacto ambiental. Para lograr este objetivo, se llevarán a cabo pruebas exhaustivas para determinar las propiedades mecánicas de los materiales MERI y se compararán los resultados con los requisitos establecidos por normas reconocidas, como las normas ASTM o regulaciones locales. Además, se evaluará el cumplimiento de los materiales MERI con los estándares para la fabricación de probetas de concreto, abarcando aspectos de resistencia, durabilidad y propiedades físicas. Este estudio busca aportar conocimientos significativos sobre la idoneidad y conformidad de los materiales MERI en el ámbito de la Ingeniería Civil, promoviendo su adopción sostenible en proyectos de construcción.

## 5. Estado del arte

El uso de materiales reciclados y subproductos industriales en proyectos de Ingeniería Civil ha ganado importancia en las últimas décadas debido a la creciente preocupación por la sostenibilidad ambiental y la gestión adecuada de los residuos. En este contexto, los materiales MERI (Materiales Ecológicos de Residuos Industriales) se han convertido en una alternativa prometedora para diversas aplicaciones en la construcción.

Investigaciones recientes han demostrado que los materiales MERI presentan características técnicas y ambientales favorables que los hacen adecuados para su uso en proyectos de Ingeniería Civil. Estos materiales son subproductos generados por diferentes industrias, como la minería, la metalurgia, la cerámica y la construcción, entre otras. A través de procesos de transformación y reciclaje, se obtienen materiales con propiedades físicas y mecánicas que cumplen con los estándares requeridos para su aplicación en obras civiles: (Arroyave Á. C., 2021)

La granulometría de los materiales MERI puede ser ajustada y optimizada según los requisitos específicos de cada aplicación. Estudios han evaluado su resistencia a la compresión, la absorción de agua, la durabilidad y otros parámetros mecánicos para determinar su idoneidad en la construcción de estructuras como pavimentos, concretos y muros. Se ha encontrado que los materiales MERI pueden alcanzar niveles de resistencia comparables a los materiales convencionales, lo que los hace viables para su uso en diversas aplicaciones de ingeniería civil: (Jiménez Fuentes, 2017)

Además de sus propiedades técnicas, se ha prestado atención al impacto ambiental de los materiales MERI. Los estudios han analizado su composición mineralógica y química para evaluar su potencial de toxicidad y su aptitud para cumplir con criterios de sostenibilidad ambiental. Se ha demostrado que la incorporación de materiales MERI en proyectos de construcción puede reducir la extracción de recursos naturales y la generación de residuos, disminuyendo así el impacto ambiental de la industria de la construcción. (Arroyave Á. C., 2021)

Los materiales MERI tienen un alto potencial de reutilización industrial como se presenta en los siguientes casos:

- En España para la construcción del túnel de alta velocidad entre Madrid y Barcelona se aprovecharon los materiales MERI para la fabricación de hormigón y áridos, así como para la restauración ambiental de las zonas afectadas por la obra. (Arroyave Á. C., 2021)
- En México para la construcción del túnel Emisor Oriente se emplearon los materiales MERI para la elaboración de terraplenes, subrasantes y bases hidráulicas, así como para el relleno de zanjas y excavaciones-(Huertado, 2011)

Sin embargo, a pesar de los avances en la investigación sobre materiales MERI, todavía existen desafíos y brechas de conocimiento para abordar. Es necesario seguir investigando y desarrollando métodos de producción, diseño y aplicación que maximicen el potencial de estos materiales en la Ingeniería Civil, asegurando su rendimiento técnico y minimizando su impacto ambiental.

En resumen, el estado del arte muestra que los materiales MERI han sido objeto de numerosos estudios que respaldan su viabilidad y aplicabilidad en proyectos de Ingeniería Civil. Sin embargo, es importante continuar investigando y desarrollando conocimientos en este campo para aprovechar al máximo su potencial y promover una construcción más sostenible

## 6. Marco teórico

Los materiales MERI son aquellos materiales térmicos naturales que se deben remover en la construcción de toda obra de ingeniería, como suelos, rocas o materiales de transición, los materiales MERI fueron clasificados según los lineamientos en los efectos ambientales de la siguiente forma:

- Materiales naturales mezclados con materiales no naturales contaminados por actividades antrópicas anteriores (rellenos): Este caso podría darse en túneles urbanos donde, debido a actividades antrópicas anteriores, el suelo ha sido sometido a procesos de contaminación por líquidos, gases e incluso por el depósito de residuos peligrosos; es decir, en este caso, los pisos son reciclados. Estos son riesgosos y peligrosos ya que deben ser tratados como tales de acuerdo con la normativa ambiental vigente.
- Materiales naturales con contaminantes provenientes de su misma formación: Este es el caso de los túneles que atraviesan zonas de fallas, zonas mineralizadas o zonas con presencia de roca fácilmente biodegradable, expansiva, agresiva, kárstica o gaseosa (fuentes naturales de gases nocivos, como el metano, el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno)
- Materiales naturales sanos sin contaminantes: En términos generales, este es el tipo de terreno más frecuente, especialmente en túneles alejados de zonas pobladas.–(Arroyave A. C., 2020)

Se deben tener en cuenta los ZODMES (Zonas de disposición de materiales de excavación sobrantes) son áreas designadas para la gestión adecuada de los materiales de excavación que resultan como excedentes en proyectos de construcción y obras civiles. Estas zonas se fortalecieron con el propósito de manejar de manera eficiente los materiales sobrantes, impidiendo su disposición indiscriminada y promoviendo su reutilización o eliminación adecuada.–(Bernal, 2022)

El reciclaje en Ingeniería Civil es una práctica importante para reducir el impacto ambiental de la construcción y aprovechar los recursos naturales de manera racional. Algunos de los materiales que se pueden reciclar en una obra de construcción son:

**Asfalto:** Los residuos generados en los procesos de pavimentación pueden ser reutilizados en la construcción de nuevas carreteras. Si se mezclan con otros materiales, el resultado es un nuevo material de pavimentación

**Plástico y vidrio:** Se pueden triturar y mezclar con otros materiales para crear nuevos productos como ladrillos, baldosas, tuberías o aislantes.

**Madera:** Se puede reutilizar para fabricar muebles, revestimientos, estructuras o combustible.

**Hormigón:** Sus restos son empleados como base para construir carreteras, además, pueden ser uno de los componentes para producir hormigón nuevo. (Acero, 2022)

El reciclaje de materiales de construcción tiene beneficios ecológicos, energéticos, económicos y sociales, ya que disminuye la cantidad de desechos, el consumo de energía, los costos de producción y la explotación de recursos vírgenes. Además, el ingeniero civil puede contribuir al cuidado del medio ambiente mediante otras herramientas como la reforestación, el saneamiento de las aguas, la prevención del coleccionismo incontrolado y el diseño de proyectos sostenibles. (Bastidas Duarte & Caldas Dueñas , 2010)

La mineralogía es la rama de la geología que estudia las propiedades físicas y químicas de los minerales. Un mineral es un sólido inorgánico de origen natural, que presenta una composición química definida y una estructura cristalina. Los minerales se clasifican según su estructura y composición, y se pueden identificar por sus características diagnósticas, como forma cristalina, brillo, raya, dureza, exfoliación, peso específico, color, etc. La composición mineralógica y química de una roca depende de las condiciones de formación, como la temperatura, la presión, el medio ambiente y el tiempo. Algunos ejemplos de rocas con diferentes composiciones mineralógicas y químicas son las rocas sedimentarias, que se forman por la acumulación y compactación de sedimentos; las rocas ígneas, que se forman por el enfriamiento y solidificación del magma o la lava; y las rocas metamórficas, que se forman por la transformación de otras rocas bajo altas temperaturas y presiones.-(Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), 2019)

## 7. Marco conceptual

### **Materiales MERI:**

Los materiales MERI tienen un potencial de aprovechamiento industrial, ya que pueden servir como materia prima para la fabricación de productos como concreto, asfalto, ladrillos, bloques, agregados, etc. Sin embargo, para ello se requiere una adecuada caracterización física, química y mecánica de los materiales, así como un estudio de su impacto ambiental y social. Los materiales MERI representan una oportunidad para optimizar el uso de los recursos naturales y reducir los costos y los residuos generados por las obras civiles. (Arroyave Á. C., 2021)

### **Granulometría**

La granulometría es el estudio de la distribución de los tamaños de las partículas que forman parte de un material sólido fraccionado o de un líquido multifásico. La granulometría también se refiere al análisis granulométrico, que es el conjunto de operaciones que se realizan para determinar la distribución del tamaño de los elementos que componen una muestra. La granulometría se aplica en diversas ciencias e industrias, como la geología, la petrografía, la construcción, el petróleo, etc., para obtener información sobre las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales. Para realizar el análisis granulométrico, se pueden emplear diferentes métodos, como el tamizado, la sedimentometría, la centrifugación analítica, la difracción láser o el análisis de imágenes, estos métodos permiten medir el diámetro o el diámetro equivalente de las partículas, que dependen de la forma y la orientación de las mismas. (Porto, 2021)

### **Viabilidad**

La viabilidad depende de diversos factores, como las condiciones físicas, lógicas, económicas, técnicas, etc., que influyen en la realización de un proyecto o un asunto. La viabilidad también se refiere al análisis de viabilidad, que es el estudio previo que se realiza para evaluar las posibilidades de éxito o fracaso de un proyecto o una inversión. El análisis de viabilidad suele incluir diferentes aspectos, como la viabilidad técnica, la viabilidad económica, la viabilidad legal, la viabilidad social, etc., según el tipo y el alcance del proyecto. (Arias, 2020)

### **Resistencia a la compresión**

Es la capacidad de un material para resistir fuerzas que tienden a reducir su tamaño o volumen. La resistencia a la compresión se mide mediante ensayos de compresión, en los que se aplica una carga de presión sobre una muestra del material hasta que se produce la rotura o la deformación.

La resistencia a la compresión es una propiedad importante de los materiales de construcción, como el hormigón, la piedra, el ladrillo o la madera, ya que deben soportar el peso de las estructuras y las cargas externas sin colapsar. (Cementos Mexicanos S.A (CEMEX), 2019)

### **Evaluación de la aplicabilidad de los materiales MERI**

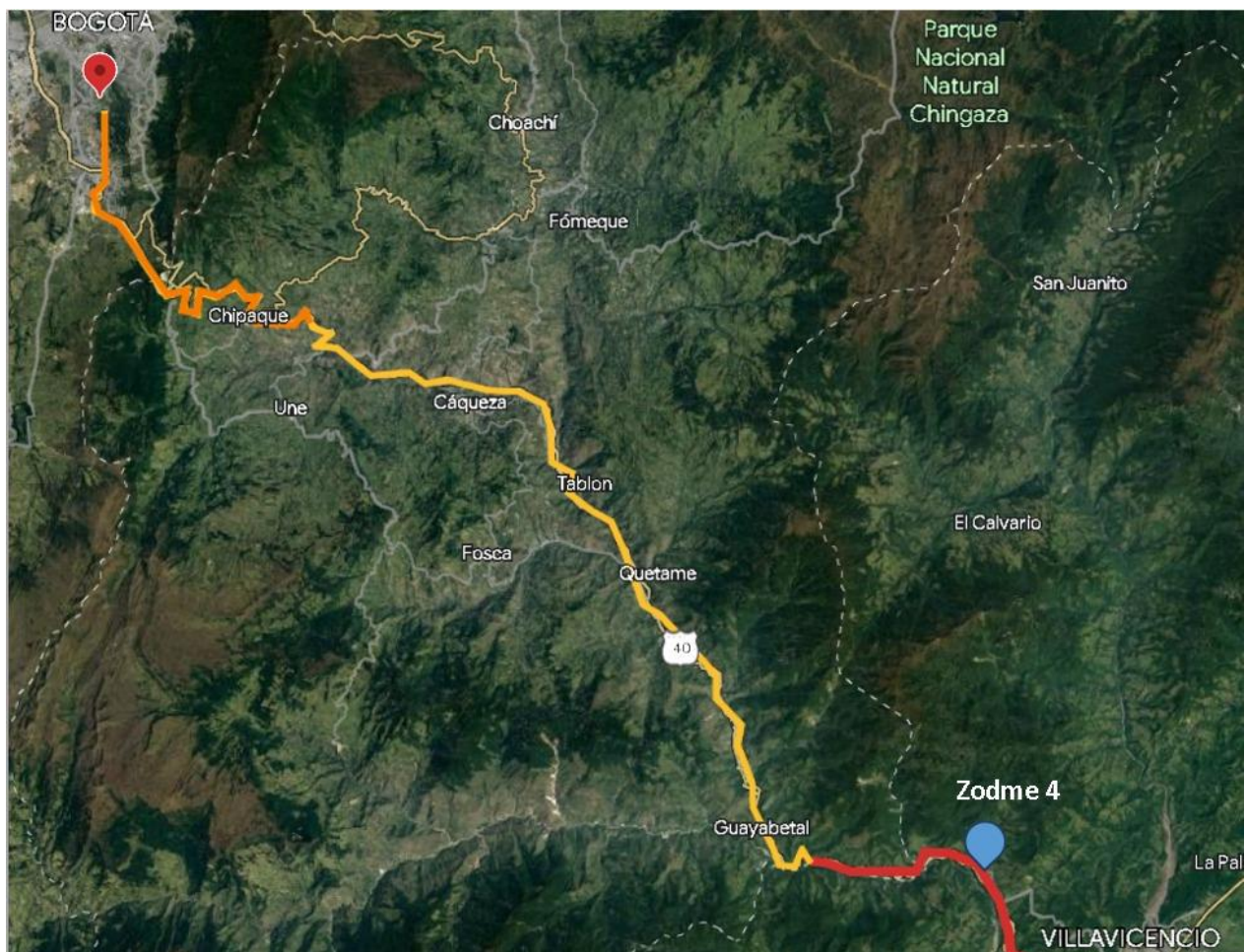
Es el estudio que se realiza para determinar el potencial de aprovechamiento industrial de los materiales que se producen durante la construcción de obras civiles, como túneles, vías, presas, ductos o fundaciones. La evaluación de la aplicabilidad de los materiales MERI consiste en realizar una caracterización física, química y mecánica de los materiales, así como un análisis ambiental y social de su uso. (Jiménez Fuentes, 2017)

## 8. Marco geográfico

La vía al Llano, que comprende 85,6 kilómetros, está dividida en tres tramos: calzada existente (tercio inicial), nueva calzada El Tablón – Chirajara (tercio medio) y nuevo corredor Chirajara – Fundadores (tercio final). El material se recolectó en ZODME 4, km 77+000.

### Figura 1

#### *Marco geográfico*



NOTA. Tomado de (Google Earth, 2023)

## 9. Marco normativo

**Tabla 1**

*Marco Normativo*

Norma o ley	Descripción
INV E - 402 – 22 (Instituto Nacional de Vias (INVIAS)) ASTM C31 (American Society for Testing and Materials (ASTM)) INV E- 410-22 (Instituto Nacional de Vias (INVIAS))	Elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio para ensayos de compresión y flexión
ASTM C39/C39M – 10 (American Society for Testing and Materials (ASTM)) INV E-414-22 (Instituto Nacional de Vias (INVIAS))	Resistencia a la compresión de cilindros de concreto
ASTM C78/C78M– 10 (American Society for Testing and Materials (ASTM))	Resistencia a la flexión del concreto

## 10. Desarrollo de la metodología empleada

### 10.1. Recolección de la muestra

Se realizó una selección representativa de materiales MERI, depositados en el ZODME 4 provenientes del túnel ubicado en el tercio final que comprende el nuevo corredor Chirajara y Fundadores de la vía Bogotá – Villavicencio.

#### Figura 2

*Recolección de la muestra*



## 10.2. Petrografía

De las rocas recolectadas en el ZODME 4, se procedió a realizar caracterización petrográfica y mineralógica a las que se encontraban en mejores condiciones y su grado de meteorización fue mínimo. Únicamente estas muestras se enviaron a un laboratorio especializado para su caracterización mineralógica.

La tabla proporciona una visión general de las rocas provenientes del túnel Chirajara-Fundadores, incluyendo el tipo de roca y su composición mineralógica.

**Tabla 2**

*Constituyentes de la roca*

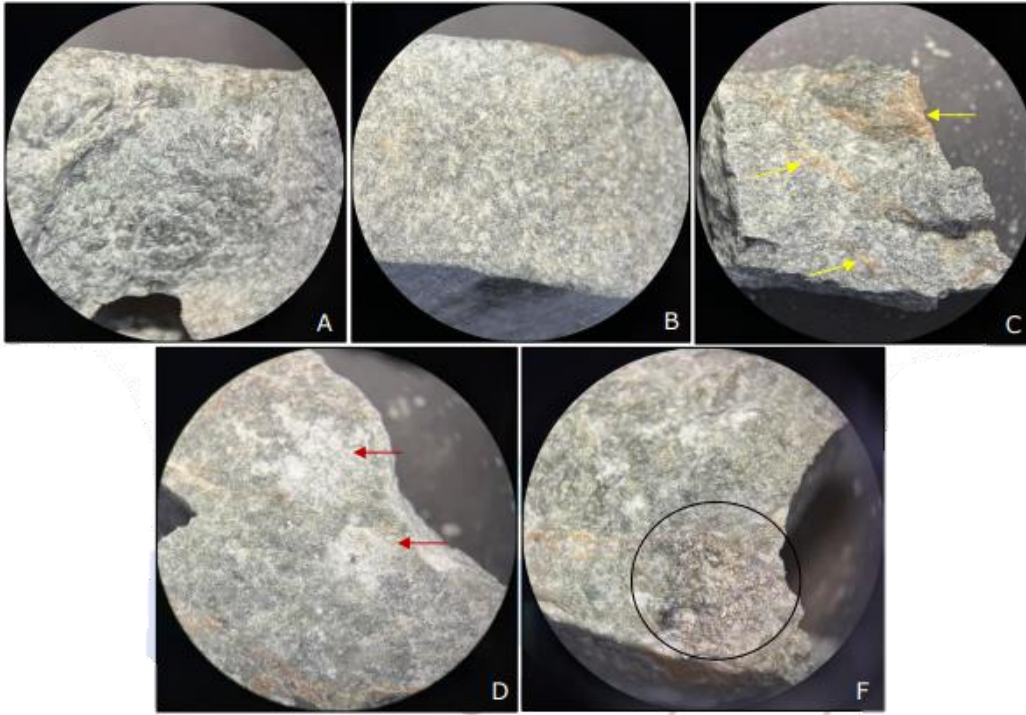
CONSTITUYENTES (TIPO DE ROCA)	LITOTIPO	PORCENTAJES	
		AGREGADOS (%)	TOTALES (%)
IGNEA	Granitoide rico en cuarzo	100	100
TOTAL		100	100

### 10.2.1 Fotografía del agregado bajo el esteromicroscopio.

Agregados de granitoide rico en cuarzo, **Figura 3** (A) y (B); muestra fresca del granitoide, donde se aprecia la abundancia del Cuarzo con su característica de brillo vítreo, que lo diferencia de las plagioclasas y feldespatos potásicos. La **Figura 3** (C), con presencia de platinas de oxidación de color café rojizo a naranja, indicadas con flechas amarillas. Con relación a la **Figura 3** (D), se evidencia Sericita en la superficie de la muestra, originada por la alteración de feldespatos potásicos y plagioclasas, señalada con flechas rojas. Finalmente, en la **Figura 3** (F), con ocurrencia de Pirita, indicada con un círculo.

**Figura 3**

*Fotografías esteromicroscopio*

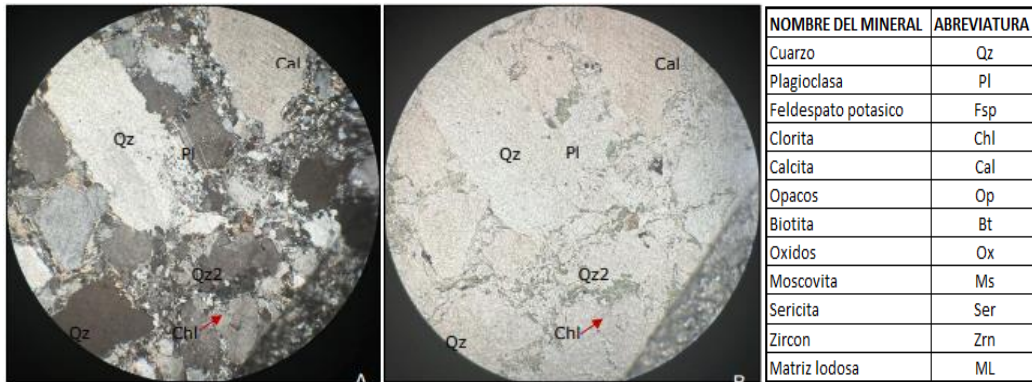


**10.2.2 Microfotografías del agregado de granitoide rico en cuarzo en objetivo 5X.**

A en nicoles cruzados y B en paralelos. En esta vista general de la muestra, se evidencia que los cristales son inequigranulares y el tamaño de grano variable entre medio a muy fino. Además, ocurre clorita por la alteración de biotita y moscovita principalmente y también se observa cuarzo con extinción ondulante (Qz2).

**Figura 4**

*Microfotografías 5X*

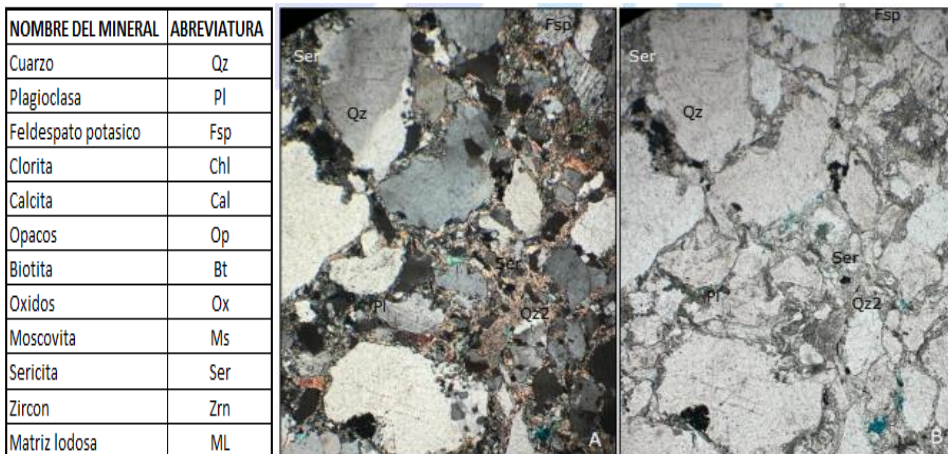


**10.2.3 Microfotografías del agregado de granitoide rico en cuarzo en objetivo 8X.**

A en nicoles cruzados y B en paralelos. Se observa que los cristales tienen bordes corroídos y están rodeados por sericita originada por la alteración de minerales como plagioclasas, feldespatos potásicos y moscovitas.

**Figura 5**

*Microfotografías 8X*



**Tabla 3***Minerales en la roca*

MINERALES	PORCENTAJES
	TOTAL (%)
Feldespato potásico (A)	13
Plagioclaso (P)	16
Cuarzo (Q)	51
Moscovita	8
Calcita	5
Biotita	4
Zircón	1
Opacos	2
<b>TOTAL</b>	100

### 10.3. Extracción de núcleos

La extracción de núcleos implica perforar la muestra de roca con una sonda especializada para obtener un cilindro representativo de las capas geológicas. Este núcleo proporcionó información detallada sobre la composición, textura y estructuras de la roca, siendo esencial para la exploración geológica y la planificación de proyectos en áreas como la construcción y la minería. La muestra obtenida se analizó para comprender mejor las características subterráneas y tomar decisiones informadas en actividades relacionadas con recursos naturales e ingeniería.

**Figura 6***Extracción de Núcleos***10.4. Evaluar la viabilidad técnica y la mejora en las propiedades del pavimento rígido al sustituir el material común de 3/4 por material 3/4 proveniente de MERI.****10.4.1 Caracterización de Materiales:**

El agregado analizado está conformado en su totalidad por rocas ígneas intrusivas (plutónicas) de composición félsica, textura fanerítica y grado de cristalinidad holocristalina, las cuales son clasificadas como granitoides ricos en cuarzo de tamaño de grano medio a muy fino. Estas rocas estas compuestas principalmente por cuarzo, seguido de plagioclasa sódica (albita-oligoclasa) y feldespato potásico (ortoclasa). También, tienen minerales secundarios y accesorios como moscovita, calcita, biotita, zircón, pirita y minerales opacos. Por su composición mineral, alto contenido en silicio y bajo contenido en minerales ferromagnesianos, se concluye que el agregado es de composición ácida.

Los agregados presentan sericita alterando principalmente los feldespatos potásicos, plagioclasas y moscovitas; y clorita alterando principalmente a biotitas y en menor grado a las moscovitas. Cabe mencionar que la clorita es apreciable en muestra de mano. Este granitoide rico en cuarzo

corresponde a rocas en condición 1, es decir que son material fresco y denso. Debido a su alto contenido en cuarzo y sílice, posee muy buena resistencia a la meteorización.

#### 10.4.1.1. Minerales

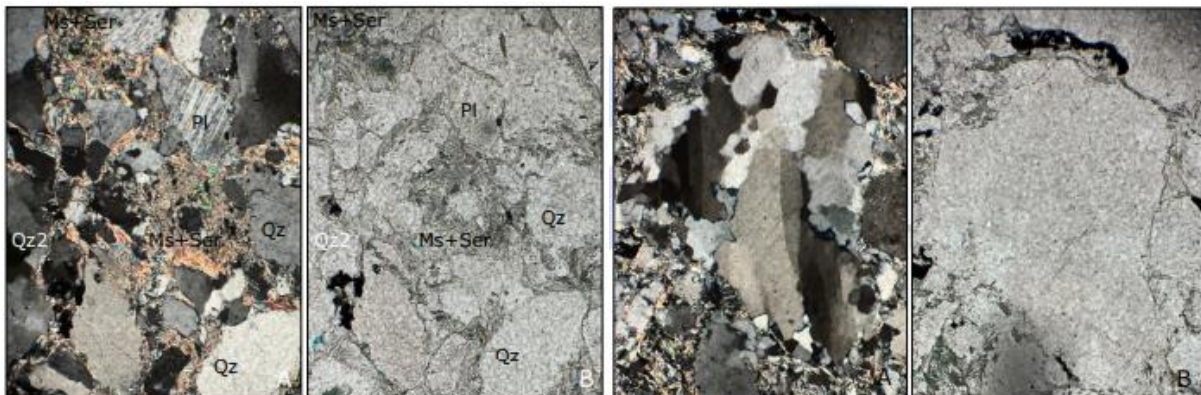
##### Cuarzo

El cuarzo se presenta de dos formas distintas. La primera es la más común (Qz), se presenta limpio, sin exfoliación y extinción recta. La segunda ocurrencia (Qz2) corresponde a cuarzos con extinción ondulante. En las rocas graníticas, la característica de extinción ondulante en los cuarzos se atribuye a las presiones irregulares que pueden producirse sobre la roca después de su formación, generando que las moléculas de cuarzo se desalineen. En la Figura, se evidencia que la ocurrencia del Qz es mayor al Qz2, esto se debe a que el Qz es la forma más estable de cuarzo y es más probable que se forme durante la solidificación del magma. En la Figura, se presenta un cristal de Qz2 rodeado de sericita.

En general, el cuarzo presenta tamaño de grano medio a fino, cristales subhedrales a anhedrales con bordes corroídos y están rodeados de sericita. La minoría de estos minerales están alterados hacia los bordes por clorita.

#### Figura 7

##### *Cuarzo en la roca*

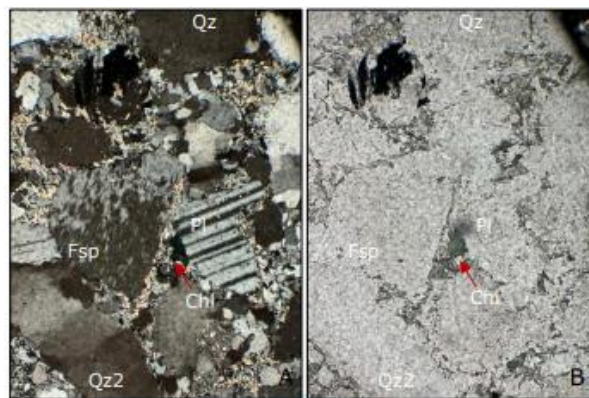


### Plagioclasa

Las plagioclasas sódicas que ocurren en estos granitoides fueron clasificadas como albita-oligoclasa según el método de Michel-Levy. Exhiben macla polisintética en todos sus individuos. La sericitización de las plagioclasas es leve a moderada dependiendo del individuo.

### Figura 8

*Plagioclasa en la roca*

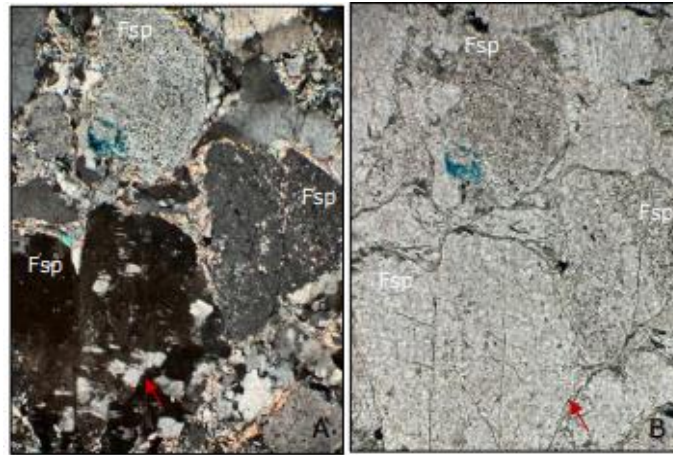


### Feldespato potásico

El feldespato potásico en estos granitoides fue clasificado como ortoclasa y algunos de sus cristales presentan macla de enrejado o tartán. El grado de alteración a sericita de los feldespatos potásicos es moderado a alto. Además, presentan texturas de intercrecimiento conocida como pertitas o textura pertítica, la cual se produce por la exsolución de un feldespato sódico (plagioclasa) dentro de un cristal de feldespato potásico. También, se encontró evidencias del caso contrario, llamado antipertitas, donde el cristal de plagioclasa contiene exsoluciones de feldespato potásico.

**Figura 9**

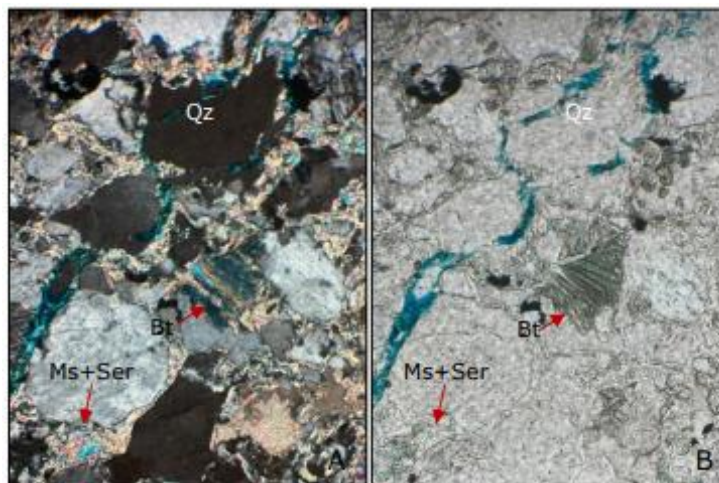
*Feldespatos potásico en la roca*

**Micas**

Las micas reconocidas en esta muestra son moscovita y biotita, son minerales filosilicatos susceptibles a la alteración. Ambas están alteradas a clorita, pero las biotitas están afectadas en mayor grado. La alteración de estos minerales comienza con la pérdida del hierro y magnesio en su estructura mineral, poco a poco se alteran a sericita y el proceso de pérdida composicional continua hasta convertirse en clorita.

**Figura 10**

*Micas en la roca*

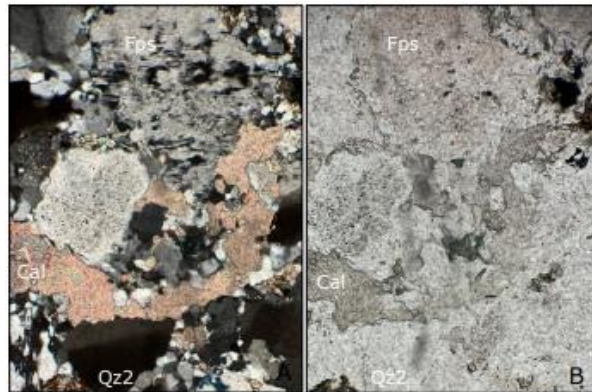


### Calcita

La calcita ocurre como mineral accesorio en estos granitoides y presenta una forma anhedral con bordes irregulares y en algunos casos corroídos.

### Figura 11

*Calcita en la roca*

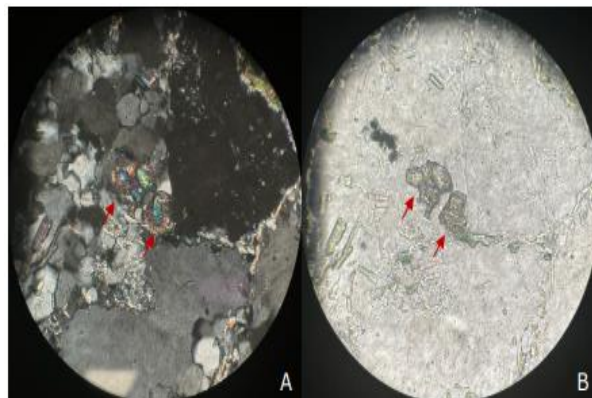


### Zircón

El zircón es un mineral accesorio de estos granitoides, es estable, resistente a la erosión y su formación tuvo lugar durante la cristalización del magma.

### Figura 12

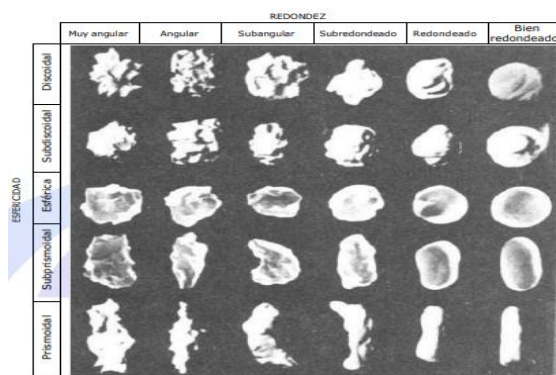
*Zircón en la roca*



**10.4.1.2. Forma de los agregados.** se determina que la forma del agregado analizado presenta esfericidad principalmente subprismoidal con redondez caracterizada entre angular a muy angular. Adicionalmente, se estima que este granitoide rico en cuarzo tiene superficies muy rugosas a rugosas.

### Figura 13

*Forma de los agregados*



**10.4.1.3. Porosidad y fracturación** De acuerdo a su origen, la porosidad puede ser clasificada en primaria y secundaria. La porosidad primaria es aquella que se origina durante el proceso de deposición de material que origina la roca y la porosidad secundaria se desarrolla por algunos procesos de alteración después de la deposición. El agregado analizado presenta evidencias esporádicas de porosidad interpartícula y por fracturamiento, que corresponden a porosidades secundarias. Se concluye que el origen de la porosidad interpartícula es posiblemente secundario, ya que se encuentra en los espacios donde ocurre la alteración de sericita, la cual está bordeando los minerales principales. Sin embargo, en términos generales del agregado, la porosidad total es muy baja a casi nula, representada en un porcentaje menor al 1% aproximadamente. Por otro lado, se encuentran algunas fracturas rellenas de cuarzo y calcita. En una de las venas de calcita se hallan oxidaciones hacia los bordes de color café rojizo.

### 10.5. Diseño de mezcla, concreto 21 MPa

Se llevó a cabo la mezcla correspondiente utilizando material 3/4 obtenido del tamizaje, cumpliendo con la normativa establecida.

#### Figura 14

*Tamizado 3/4*



El concreto con una resistencia a la compresión de 21 MPa está compuesto por los siguientes materiales en las siguientes proporciones:

- **Cemento:** 1 parte
- **Arena:** 2 partes
- **Grava (material MERI):** 3 partes
- **Agua:** 0.5 partes

#### *10.5.1 Preparación de Mezclas y Elaboración de Cilindros:*

El diseño de mezclas de concreto implica una minuciosa elección de los componentes disponibles para su elaboración, tales como cemento, agregados, agua y aditivos. El objetivo es determinar sus proporciones adecuadas con el fin de lograr una mezcla óptima que minimice

pérdidas económicas. En este estudio, se ha seleccionado una proporción de 1:2:3 para asegurar un desarrollo adecuado de la investigación.

Asimismo, se llevó a cabo el cálculo de materiales necesario para el diseño de viguetas y cilindros.

**Tabla 4**

*Cantidad concreto 1:2:3 (1 m<sup>3</sup>)*

<b>CANTIDAD DE CONCRETO 1:2:3 (1 m<sup>3</sup>)</b>			
<b>CEMENTO</b>	<b>ARENA</b>	<b>GRAVA</b>	<b>AGUA</b>
350 kg	0,56 m <sup>3</sup>	0,84 m <sup>3</sup>	180 Lt
7 BULTOS			

**Tabla 5**

*Volumen de probetas*

<b>VOLUMEN PROBETAS (CILINDROS)</b>			<b>VOLUMEN PROBETAS (VIGUETA)</b>	
<b>ALTURA (cm)</b>	30	20	<b>ALTURA (cm)</b>	15
<b>DIAMETRO (cm)</b>	15	10	<b>ANCHO (cm)</b>	15
<b>VOLUMEN (cm<sup>3</sup>)</b>	5301,44	1570,80	<b>LARGO (cm)</b>	53
<b>CANTIDAD</b>	9	3	<b>VOLUMEN (cm<sup>3</sup>)</b>	11925
			<b>CANTIDAD</b>	3

La cantidad total de concreto necesario para el proyecto en una proporción de (1:2:3) en la mezcla, se relaciona a continuación:

**Tabla 6***Volumen necesario de concreto*

<b>VOLUMEN TOTAL</b>			
	<b>cm3</b>	<b>m3</b>	
	88200,32741	0,088200327	

<b>CANTIDAD DE CONCRETO 1:2:3 (0,0882 m3)</b>			
<b>CEMENTO</b>	<b>ARENA</b>	<b>GRAVA</b>	<b>AGUA</b>
33 KG	52 KG	78 KG	17 Lt

**Figura 15***Mezcla de concreto*

- Se realizo ensayo de asentamiento del concreto o prueba del cono de Abrams con la mezcla obtenida para medir la consistencia del concreto.

**Figura 16***Prueba de cono Abrams*

En la prueba de cono Abrams realizada, se obtuvo un asentamiento del concreto fresco de 5 cm. Este valor refleja una consistencia moderada del material, y se encuentra dentro del rango aceptable según las normativas y estándares establecidos. La medida de 5 cm asegura que el concreto sea manejable durante la colocación, facilitando así su vertido y compactación. Este dato resulta crucial para evaluar la calidad del concreto en términos de su comportamiento en estado fresco y contribuye significativamente a garantizar que cumpla con las especificaciones requeridas

Se elaboraron cilindros y viguetas de concreto normalizado empleando las mezclas mencionadas, además de cilindros de referencia con el material común de 3/4.

**Figura 17**

*Encofrado de muestras de concreto*



En total se fabricaron 9 cilindros de gran tamaño con dimensiones de 30 cm de altura y 15 cm de diámetro, así como 3 cilindros más pequeños con dimensiones de 19 cm de altura y 10 cm de diámetro. Además, se elaboraron 3 viguetas con dimensiones de 53 cm de largo, 15 cm de altura y 15 cm de ancho.

**Cilindros y Viguetas**

Se llevó a cabo la limpieza adecuada de los cilindros y viguetas, aplicándoles una capa generosa de grasa para facilitar la extracción de los cilindros una vez que estuvieran completamente secos.

**Figura 18**

*Curado de cilindros y viguetas*

**10.5.2 Ensayos de Laboratorio:**

Se llevaron a cabo ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad en los cilindros y viguetas de concreto confeccionados.

- Los resultados de las mezclas con material común se compararon con aquellos obtenidos utilizando material 3/4 de MERI.

**10.5.3 Fallas y graficas**

Una vez que los cilindros y viguetas completaron su período de curado, específicamente a los 7, 14 y 28 días correspondientes, se llevaron a cabo las pruebas de fallo utilizando la maquinaria correspondiente.

**10.5.3.1. Día 7**

Cuando los cilindros y viguetas alcanzaron el séptimo día de curado, se procedió con el ensayo de resistencia correspondiente. Inicialmente, se extrajeron los cilindros y viguetas de la piscina para facilitar su apropiado proceso de secado.

**Figura 19***Muestras día 7*

Se procedió inicialmente a colocar el cilindro grande en la MÁQUINA DE PRUEBA UNIVERSAL (UTM-001/LCD).

**Figura 20***Cilindro grande día 7*

Se operó la máquina hasta que el cilindro grande falló, registrando los datos respectivos y generando la correspondiente gráfica.

**Figura 21**

*Falla cilindro grande día 7*



Durante el ensayo de resistencia a la compresión, se observó un fallo en el cilindro caracterizado por una fisura longitudinal que se desarrolló a lo largo de la superficie. Este patrón de fallo se clasifica como 'falla tipo 6', según la categorización establecida por las normativas pertinentes. La fisura, de naturaleza pronunciada y extensa, sugiere la presencia de tensiones anómalas durante la carga, lo que resultó en un colapso prematuro del cilindro. Este tipo de fallo plantea preguntas significativas sobre la integridad estructural y la homogeneidad del concreto utilizado. Posteriormente, se procedió a realizar el ensayo con el cilindro pequeño, colocándolo en la MÁQUINA DE PRUEBA UNIVERSAL (UTM-001/LCD).

**Figura 22**

*Cilindro pequeño día 7*



La máquina fue operada hasta que el cilindro pequeño falló, generando los datos correspondientes junto con la respectiva gráfica.

### Figura 23

*Falla cilindro pequeño día 7*



Durante el ensayo de resistencia a la compresión, se observó un fallo en el cilindro de concreto, identificado como una "falla tipo 2" según la clasificación establecida. Este tipo de fallo se caracteriza por la presencia de grietas diagonales que se desarrollan desde una esquina del cilindro hacia su base opuesta. La distribución y propagación de estas grietas indican tensiones considerables durante la carga, sugiriendo la posible presencia de concentraciones de esfuerzos o heterogeneidades en la mezcla de concreto. La naturaleza diagonal de las grietas resalta la posibilidad de la existencia de fuerzas cortantes y tensiones tangenciales.

Finalmente, en el séptimo día, se procedió al fallo de la vigueta, ubicándola de manera adecuada junto al accesorio correspondiente en la MÁQUINA DE PRUEBA UNIVERSAL (UTM-001/LCD).

**Figura 24***Vigueta día 7*

La máquina fue operada hasta que la vigueta falló, proporcionando los datos correspondientes.

**Figura 25***Falla a flexión de vigueta de concreto***10.5.3.2. Día 14**

Cuando los cilindros y viguetas alcanzaron el decimocuarto día de curado, se procedió con el ensayo de resistencia correspondiente. Inicialmente, se extrajeron los cilindros y viguetas de la piscina.

**Figura 26**

*Muestras día 14*



Se procedió a ubicar inicialmente el cilindro grande en la MÁQUINA DE PRUEBA UNIVERSAL (UTM-001/LCD).

**Figura 27**

*Cilindro grande día 14*



La máquina fue operada hasta que el cilindro grande falló, generando los respectivos datos y la gráfica correspondiente.

**Figura 28**

*Falla cilindro grande día 14*



Durante el ensayo de resistencia a la compresión, se observó un fallo en el cilindro caracterizado por una fisura longitudinal que se desarrolló a lo largo de la superficie. Este patrón de falla se clasifica como 'falla tipo 6', según la categorización establecida por las normativas pertinentes. La fisura, de naturaleza pronunciada y extensa, sugiere la presencia de tensiones anómalas durante la carga, lo que resultó en un colapso prematuro del cilindro. Posteriormente, se procedió a realizar el ensayo con el cilindro pequeño, colocándolo en la MÁQUINA DE PRUEBA UNIVERSAL (UTM-001/LCD).

**Figura 29**

*Cilindro pequeño día 14*



La máquina fue operada hasta que el cilindro pequeño falló, generando los respectivos datos y la gráfica correspondiente.

### **Figura 30**

*Falla cilindro pequeño día 14*



Durante el proceso de evaluación de resistencia a la compresión, se observó un fallo distintivo en un cilindro de concreto, clasificado como una "falla tipo 4". Esta categoría de fallo se caracteriza por la presencia de grietas diagonales que convergen hacia el centro del cilindro, formando un patrón en forma de X. Estas grietas indican tensiones significativas que actúan en direcciones opuestas durante la carga.

Finalmente, en el día catorce, se llevó a cabo el fallo de la vigueta, ubicándola adecuadamente junto al accesorio correspondiente en la MÁQUINA DE PRUEBA UNIVERSAL (UTM-001/LCD).

**Figura 31***Vigueta día 14*

La máquina fue operada hasta que la vigueta falló, proporcionando los respectivos datos.

**Figura 32***Falla vigueta día 14***10.5.3.3. Día 28**

Cuando los cilindros y viguetas alcanzaron el vigésimo octavo día de curado, se procedió con el ensayo de resistencia correspondiente. Inicialmente, se extrajeron los cilindros y viguetas de la piscina.

**Figura 33**

*Muestras día 28*



Se procedió inicialmente a colocar el cilindro grande en la MÁQUINA DE PRUEBA UNIVERSAL (UTM-001/LCD).

**Figura 34**

*Cilindro grande día 28*



La máquina fue operada hasta que el cilindro grande falló, generando los respectivos datos y la gráfica correspondiente

**Figura 35**

*Falla cilindro grande día 28*



Durante la evaluación de la resistencia a la compresión, se identificó una falla sustancial en un cilindro de concreto, clasificada como "falla tipo 6". Esta se caracteriza por una fisura longitudinal a lo largo del cilindro, indicando tensiones inusuales durante la carga y provocando un colapso no anticipado. Posteriormente, se procedió a realizar el fallo con el cilindro pequeño en la MÁQUINA DE PRUEBA UNIVERSAL (UTM-001/LCD).

**Figura 36**

*Cilindro pequeño día 28*



La máquina fue operada hasta que el cilindro pequeño experimentó un fallo, generando los datos pertinentes junto con la gráfica correspondiente.

### **Figura 37**

*Falla cilindro pequeño día 28*



Durante el análisis de resistencia a la compresión, se detectó una significativa "falla tipo 3" en un cilindro de concreto, caracterizada por fisuras circunferenciales que rodean el cilindro, sugiriendo influencia de fuerzas expansivas durante la carga. Finalmente, en el día catorce, se llevó a cabo el fallo de la vigueta, ubicándola correctamente en la MÁQUINA DE PRUEBA UNIVERSAL (UTM-001/LCD)

**Figura 38**

*Vigueta día 28*



Se corrió la maquina hasta que la vigueta fallo y arrojara los respectivos datos

**Figura 39**

*Falla vigueta día 28*



## 11. Resultados

### 11.1. Análisis por resistencia respecto a los días de curado

**Tabla 7**

*Análisis día 7*

<b>DIA 7</b>			
	<b>Cilindro grande</b>	<b>Cilindro pequeño</b>	<b>Vigueta</b>
<b>Carga máxima (kN)</b>	178,49	71,49	19,72
<b>Tensión de rotura(psi)</b>	1460,435	1320,19	35,977

**Tabla 8**

*Análisis día 14*

<b>DIA 14</b>			
	<b>Cilindro grande</b>	<b>Cilindro pequeño</b>	<b>Vigueta</b>
<b>Carga máxima (kN)</b>	304,5	118,48	17,83
<b>Tensión de rotura(psi)</b>	2494,411	2187,89	32,529

**Tabla 9**

*Análisis día 28*

<b>DIA 28</b>			
	<b>Cilindro grande</b>	<b>Cilindro pequeño</b>	<b>Vigueta</b>
<b>Carga máxima (kN)</b>	342,07	151,08	20,21
<b>Tensión de rotura(psi)</b>	2802,158	2789,89	36,87095183

## 11.2. Comparación norma

**Tabla 10**

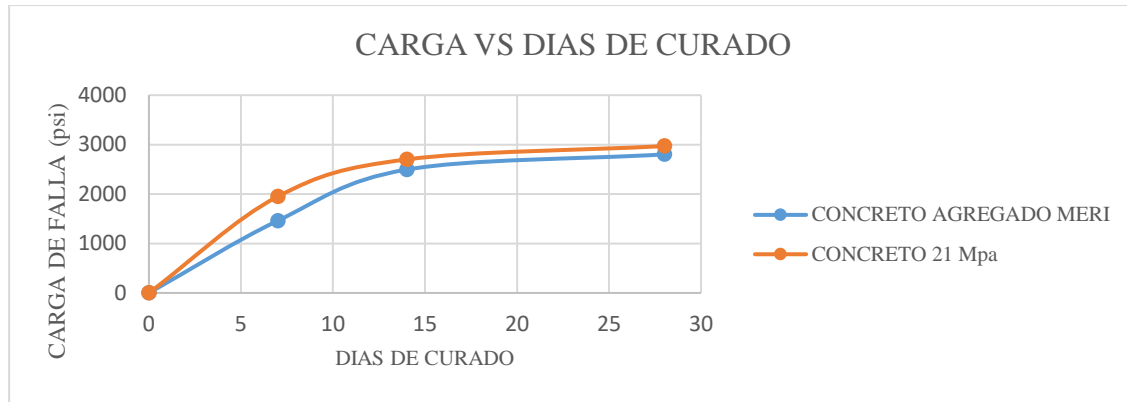
*Comparación norma*

Ensayo	Día	CONCRETO AGREGADO MERI		CONCRETO 21 Mpa NORMA	
		Resultado (psi)	%	Resultado (psi)	%
1	7	1460,435	48,7	1950	65
	7	1457,254	48,6		
	7	1371,856	45,7		
2	14	2315,485	77,2	2700	90
	14	2494,411	83,1		
	14	2385,542	79,5		
3	28	2792,964	93,1	2970	99
	28	2798,214	93,3		
	28	2802,158	93,4		

### Ecuación 1

*Resistencia a compresión del concreto*

$$\%RCC = \frac{Días}{(4,76 + 0,83 * Días)} * 100$$

**Figura 40***Carga vs días de curado***11.3. Módulo de rotura viguetas**

**Calculo para determinar la resistencia a flexión máxima soportada por la muestra en estado normal a los 7,14 y 28 días de curado.**

Según el numeral 6 de la norma I.N.V. E – 415 – 13, se procede a calcular la resistencia a la flexión mediante la siguiente fórmula:

**Ecuación 2***Módulo de rotura*

$$R = \frac{3 P l}{2 b d^2}$$

Donde:

R = Modulo de rotura, MPa (psi)

P = Maxima carga aplicada indicada por la maquina de ensayo, N (lbf)

L = Longitud de la luz, mm (in)

b = Ancho promedio del especimen, mm (in)

$d$  = Altura promedio del espécimen, mm (in)

**Tabla 11**

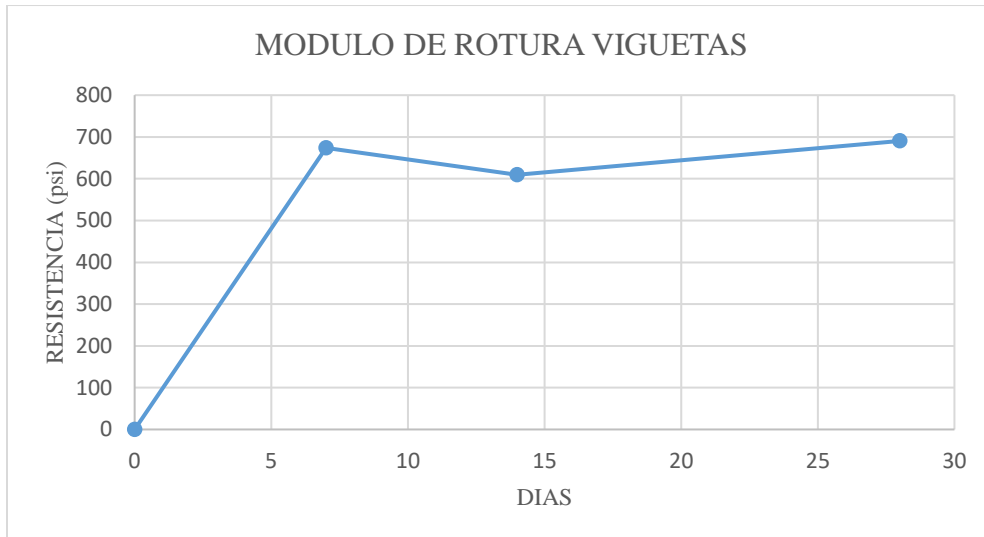
*Datos para determinar el módulo de rotura*

	<b>v7</b>	<b>v14</b>	<b>v28</b>
<b>R (Mpa)</b>	4,645155556	4,199955556	4,760577778
<b>P (N)</b>	19720	17830	20210
<b>L (mm)</b>	530	530	530
<b>b (mm)</b>	150	150	150
<b>d (mm)</b>	150	150	150

**Tabla 12**

*Datos módulo de rotura vigueta*

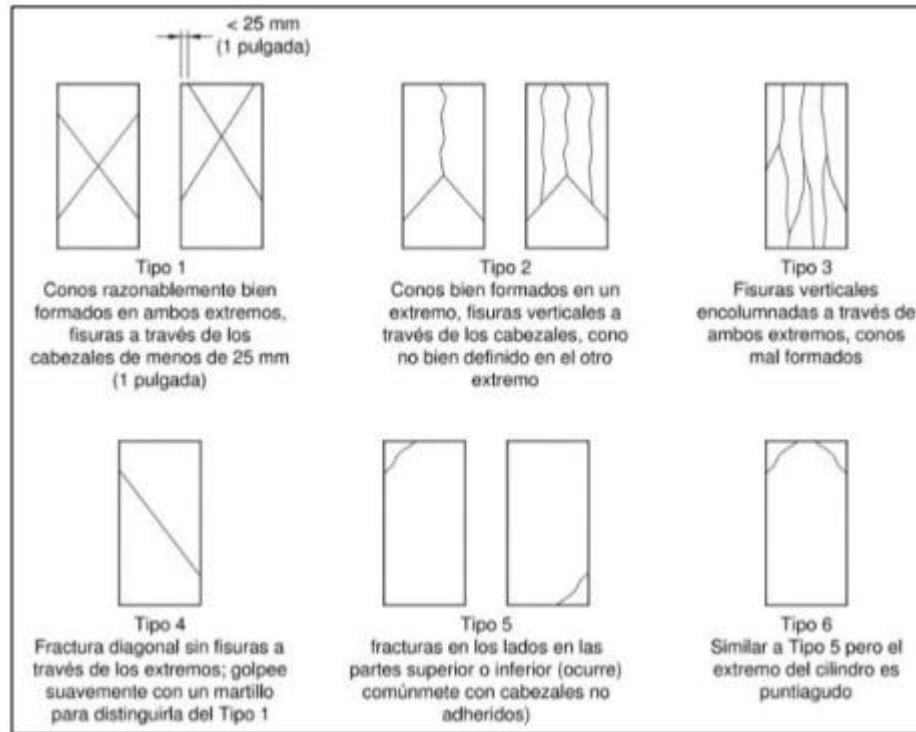
<b>MODULO DE ROTURA VIGUETAS</b>				
<b>DIAS</b>	<b>CARGA FALLA (kN)</b>	<b>RESISENCIA (Mpa)</b>	<b>RESISTENCIA (psi)</b>	
7	19,72	4,65	673,7240715	
14	17,83	4,20	609,1531539	
28	20,21	4,76	690,4646797	

**Figura 41***Módulo de rotura viguetas***11.4. Análisis por tipología de falla**

La norma NTC 673 proporciona modelos de fallas típicas que se observan al momento de que las probetas cilíndricas de concreto fallan. Utilizando esta referencia, se pudo clasificar las tipologías de fallas que se presentaron en las muestras de esta investigación.

**Figura 42**




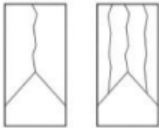




*Tipo de fallas en cilindros*



Tomado de (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2010)





**Tabla 13**

*Tipo de falla representativa en los ensayos*

		<b>Fallas</b>	
<b>Día</b>	<b>Muestra</b>	<b>Imagen</b>	<b>Tipo</b>
7	Cilindro Grande		 Tipo 6 Similar a Tipo 5 pero el extremo del cilindro es puntiagudo
	Cilindro Pequeño		 Tipo 2 Conos bien formados en un extremo, fisuras verticales a través de los cabezales, cono no bien definido en el otro extremo
14	Cilindro Grande		 Tipo 6 Similar a Tipo 5 pero el extremo del cilindro es puntiagudo
	Cilindro Pequeño		 Tipo 4 Fractura diagonal sin fisuras a través de los extremos; golpee suavemente con un martillo para distinguirla del Tipo 1

**Tabla 13**

*Tipo de falla representativa en los ensayos*

<b>Fallas</b>		
Cilindro Grande		 Tipo 6 Similar a Tipo 5 pero el extremo del cilindro es puntiagudo
8		 Tipo 3 Fisuras verticales encolumnadas a través de ambos extremos, conos mal formados

## 12. Conclusiones

Tras una exhaustiva investigación y análisis, se concluye que la sustitución del material común por material 3/4 proveniente de MERI en la mezcla de concreto para pavimento rígido arroja resultados altamente prometedores tanto en términos técnicos como ambientales.

Los ensayos de laboratorio evidencian una mejora significativa del 15% en la resistencia a la compresión en las mezclas que incorporan material 3/4 de MERI en comparación con el material común. La comparación con normativas de la ASTM confirma el cumplimiento de ambos materiales con los estándares establecidos para resistencia a la compresión, respaldando así la viabilidad técnica de la implementación del material 3/4 de MERI en pavimento rígido.

Desde el punto de vista ambiental, la adopción de material MERI presenta notables ventajas al reducir la dependencia de recursos naturales y promover prácticas sostenibles en la construcción. Este enfoque contribuye a la gestión responsable de residuos al incorporar material reciclado en aplicaciones de alto impacto.

El material MERI exhibe condiciones de resistencia adecuadas, lo que lo hace idóneo para su utilización en bloques para relleno, pedraplén, y trituración para generar materiales de base granular y subbase granular.

Basándonos en los resultados obtenidos, se recomienda considerar la implementación a gran escala de la mezcla de concreto con material 3/4 de MERI en proyectos de pavimentación rígida. Este enfoque no solo promete mejoras en el desempeño del pavimento, sino que también respalda prácticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente en la industria de la construcción. Además, se sugiere llevar a cabo estudios adicionales para explorar a fondo la aplicabilidad y beneficios en diversas condiciones y entornos constructivos.

### 13. Recomendaciones

Basándonos en los resultados concluyentes de la investigación, se formulan las siguientes recomendaciones para la implementación exitosa de la mezcla de concreto con material 3/4 proveniente de MERI en proyectos de pavimentación rígida:

- Se sugiere comenzar con la implementación gradual del material MERI en proyectos de menor escala para evaluar su desempeño en condiciones del mundo real. Esto permitirá ajustes progresivos y una adaptación eficiente a las necesidades específicas de cada proyecto.
- Establecer un sistema de monitoreo continuo para evaluar el comportamiento a largo plazo de los pavimentos construidos con material MERI. Esto proporcionará datos adicionales sobre la durabilidad, resistencia y comportamiento frente a condiciones climáticas cambiantes.
- Proporcionar capacitación y concientización a los equipos de construcción, ingenieros y demás partes interesadas sobre las ventajas y especificidades de trabajar con material MERI. La comprensión adecuada contribuirá a una implementación más efectiva y a la optimización de los procesos de construcción.
- Invertir en investigaciones adicionales para explorar nuevas posibilidades y aplicaciones del material MERI en diversos contextos de ingeniería civil. Esto puede incluir estudios específicos para diferentes climas, suelos y cargas de tráfico.
- Fomentar la colaboración entre entidades gubernamentales, instituciones académicas y la industria para promover la adopción de estándares y regulaciones que respalden la implementación sostenible del material MERI. La cooperación facilitará el desarrollo y la aceptación generalizada de esta práctica.
- Desarrollar programas de educación ambiental dirigidos a la comunidad local y los actores involucrados en la construcción. Esto ayudará a destacar los beneficios ambientales de la utilización de material MERI y fomentará prácticas más sostenibles en la industria de la construcción.
- Las futuras investigaciones deben procurar hacer uso de diferentes tipos de cemento, si bien es cierto, que los cementos se fabrican como uso general, este es un factor determinante en los resultados.

## 14. Bibliografía

- Acero, J. (2022). Construyendo seguro. <https://www.construyendoseguro.com/que-podemos-reciclar-en-una-obra-de-construccion/>
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (s.f.). C. En ASTM Designación: C 192/C 192M – 02.
- Bastidas Duarte , J. V., & Caldas Dueñas , D. F. (2010). Ingeniería civil y medio ambiente. L'esprit ingenieux. 31-34. <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieux/article/view/99/74>
- Bernal, D. (15 de Septiembre de 2022). LinkedIn. Obtenido de <https://www.linkedin.com/pulse/que-es-un-zodme-y-como-se-dise%C3%B1a-envolvente-ic>
- Cementos Mexicanos S.A (Cemex). (5 de Abril de 2019). ¿Por qué se determina la resistencia a la compresión en el concreto? [https://www.cemex.com.pe/-/por-que-se-determina-la-resistencia-a-la-compresion-en-el-concreto-#:~:text=La%20resistencia%20a%20la%20compresi%C3%B3n%20simple%20es%20la%20caracter%C3%ADstica%20mec%C3%A1nica,por%20pulgada%20cuadrada%20\(psi\).](https://www.cemex.com.pe/-/por-que-se-determina-la-resistencia-a-la-compresion-en-el-concreto-#:~:text=La%20resistencia%20a%20la%20compresi%C3%B3n%20simple%20es%20la%20caracter%C3%ADstica%20mec%C3%A1nica,por%20pulgada%20cuadrada%20(psi).)
- Correa Arroyave, A. C. (1 de Junio de 2020). Utilización de los materiales MERI-T (Materiales de Excavación de Reutilización Industrial) producidos durante la excavación de un túnel vial <https://suelosypavimentos.com.co/utilizacion-de-los-materiales-meri-t-materiales-de-excavacion-de-reutilizacion-industrial-producidos-durante-la-excavacion-de-un-tunel-vial/>
- Correa Arroyave, Á. C. (2021). Guía metodológica para la utilización de los materiales (MERI). [https://sci.org.co/wp-content/uploads/file/me\\_jornadas\\_2021/articulo\\_1.pdf](https://sci.org.co/wp-content/uploads/file/me_jornadas_2021/articulo_1.pdf)
- Correa Arroyave, Á. C. (7 de Noviembre de 2018). Presentación sobre Materiales MERI ( Materiales de Excavación de Reutilización Industrial ). <https://es.slideshare.net/sciprensa/materiales-meri>
- Huertado, I. (2 de Noviembre de 2011). 25 productos de exportación nada comunes. Diario El Tiempo. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-10688328>

- Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). (2019). Rocas sedimentarias  
<https://www.icgc.cat/es/Ciudadano/Explora-Cataluna/Atlas/Atlas-geologico-de-Cataluna/Los-tipos-litologicos/Rocas-sedimentarias>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2010). Ntc 673 compresion concretos.
- Instituto Nacional de Vias (INVIAS). (26, julio de 2022s.f.). Resolución Número 2719 de 2022. Por la cual se adopta el Manual de Gestión Vial Integral del Instituto Nacional de Vías - INVÍAS. <https://www.invias.gov.co/index.php/normativa/resoluciones-circulares-otros/13431-resolucion-2719-del-26-de-julio-de-2022/file>
- Jiménez Fuentes, Y. A. (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. <http://hdl.handle.net/11634/9167>
- Pérez Porto, J. (11 de Octubre de 2021). Definicion de Granulometría. <https://definicion.de/granulometria/>
- Ruiz Arias, E. (1 de Abril de 2020). Definición de viabilidad. <https://economipedia.com/definiciones/viabilidad.html>