

**Evaluación de la Viabilidad del Concreto Poroso con Agregado de Escoria en la Prevención
de Inundaciones en Áreas Urbanas**

Santiago Augusto Acosta Cañón

Gerson Santiago Contreras Sanabria

Universidad Santo Tomás

División de Arquitectura e Ingenierías

Facultad de Ingeniería Civil

Tunja

2024

**Evaluación de la Viabilidad del Concreto Poroso con Agregado de Escoria en la Prevención
de Inundaciones en Áreas Urbanas**

Santiago Augusto Acosta Cañón

Gerson Santiago Contreras Sanabria

**Trabajo de grado para obtener el título de
Ingeniero Civil**

Director

Juan Ricardo Pérez Cuervo

Magister en Dirección y Gestión de Proyectos

Máster en Tráfico, Movilidad y Seguridad Vial

Universidad Santo Tomás

División de Arquitectura e Ingenierías

Facultad de Ingeniería Civil

Tunja

2024

Dedicatoria

Este trabajo de grado es dedicado a nuestras familias, amigos, docentes, y demás personas que con sus valiosos aportes contribuyeron en el desarrollo de este proyecto.

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por las bendiciones recibidas durante todo este proceso académico. A nuestros padres y hermanos por su incondicional apoyo y valiosas enseñanzas para alcanzar esta meta. Al Ingeniero Mag. Juan Ricardo Pérez Cuervo quien en su calidad de director contribuyó con su dedicación y conocimiento en la elaboración y ejecución de este trabajo de grado. Al Ingeniero Mag. Anderson Mora Mora codirector externo, por su acompañamiento e importante direccionamiento en las distintas etapas del proyecto.

Agradecemos también de manera especial a nuestra querida Alma Máter Universidad Santo Tomás seccional Tunja, la cual nos ha formado como ingenieros íntegros, éticos y con grandes capacidades profesionales y de igual manera expresamos nuestra gratitud por todo el apoyo logístico brindado.

Por último, queremos realizar un reconocimiento a todos los colegas y amigos que han sido parte importante a lo largo de este periplo académico, gracias por su valiosa disposición y apoyo.

Nota de aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Tabla de Contenido

Resumen	12
Glosario	15
Introducción.....	18
1. Problema de investigación	20
1.1 Planteamiento del problema.....	20
1.2 Pregunta de investigación	21
1.3 Justificación	21
2. Objetivos.....	23
2.1 Objetivo general	23
2.2 Objetivos específicos.....	23
3. Estado del arte.	24
3.1 Perspectiva internacional del concreto poroso.....	24
3.2 Concreto poroso en Colombia.....	28
3.3 Uso de la escoria en el concreto poroso.....	30
3.4 Proceso siderúrgico en la industria del acero.....	35
3.5 Obtención y clasificación de las Escorias.....	37
3.6 Dosificación y diseño de un concreto poroso	40
4. Marco teórico	47
4.1 Porosidad.....	47
4.2 Infiltración.....	48
4.3 Absorción.....	49

4.4 Resistencia a compresión.....	49
4.5 Marco legal y normativo.....	50
5. Metodología	53
5.2 Materiales, equipos, procedimientos y ensayos de análisis	54
5.3 Materiales.....	54
5.4 Equipos e instrumentos.....	54
5.5 Procedimientos y ensayos.	54
5.6 Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos.	56
5.7 Densidad de bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto.....	57
5.8 Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½’’) por medio de la máquina los ángeles.	57
5.9 Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino.....	58
5.10 Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso.....	59
5.11 Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato micro-deval.....	60
5.12 Asentamiento del concreto de cemento hidráulico (SLUMP)	61
5.13 Resistencia a la compresión de cilindros concreto.....	62
5. Resultados.....	64
5.14 Análisis granulométrico de los agregados grueso (Grava).	65
5.15 Análisis granulométrico de los agregados grueso (Escoria).	66
5.16 Análisis granulométrico del agregado fino (Arena)	68

5.17 Densidad de bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados (grava y escoria) en estado suelto y compacto	70
5.18 Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½'')	
por medio de la máquina de los ángeles. (Escoria).....	71
5.19 Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½'')	
por medio de la máquina de los ángeles. (Grava).....	73
Conclusiones.....	89
Recomendaciones	91
Referencias	92

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Esquema del proceso siderúrgico.</i>	37
Figura 2. <i>Retirada de escoria en el horno eléctrico.</i>	39
Figura 3. <i>Esquema (a) y vista física (b) del Horno cuchara.</i>	40
Figura 4. <i>Granulometría.</i>	56
Figura 5. <i>Densidad de Bulk Suelto-Compacto.</i>	57
Figura 6. <i>Degradación de agregados gruesos con la Máquina Los Ángeles.</i>	58
Figura 7. <i>Muestra de arena sumergida en agua para la determinación la densidad aparente y la absorción.</i>	59
Figura 8. <i>Muestra de escoria sumergida en agua para la determinación de la densidad, la densidad aparente y la absorción.</i>	60
Figura 9. <i>Ensayo con micro-Deval para determinar la resistencia de la escoria</i>	61
Figura 10. <i>Prueba de asentamiento del concreto (SLUMP).</i>	62
Figura 11. <i>Elaboración de cilindros y ensayo de compresión.</i>	63
Figura 12. <i>Curva Granulométrica agregado grueso (Grava).</i>	66
Figura 13. <i>Curva Granulométrica agregado fino (Escoria).</i>	68
Figura 14. <i>Curva Granulométrica agregado grueso (Arena).</i>	69

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Porcentaje aproximado de los constituyentes del concreto, en volumen y funciones.</i>	42
Tabla 2. <i>Normas y especificaciones del INVIAS para concretos hidráulicos, ensayos y procedimientos.</i>	55
Tabla 3. <i>Seguimiento de las muestra y ensayos.</i>	64
Tabla 4. <i>Distribución por tamices de la muestra de grava.</i>	65
Tabla 5. <i>Limites granulométricos del agregado grueso (Grava).</i>	65
Tabla 6. <i>Distribución por tamices de la muestra de escoria.</i>	66
Tabla 7. <i>Limites granulométricos del agregado grueso (Escoria).</i>	67
Tabla 8. <i>Distribución por tamices de la muestra de arena.</i>	68
Tabla 9. <i>Datos ensayo Bulk agregado grueso (grava).</i>	70
Tabla 10. <i>Datos ensayo Bulk agregado grueso (escoria).</i>	70
Tabla 11. <i>Densidad de Bulk y vacíos de los agregados (grava y escoria).</i>	71
Tabla 12. <i>Granulometrías de las muestras de ensayo.</i>	72
Tabla 13. <i>Carga abrasiva según la granulometría.</i>	72
Tabla 14. <i>Porcentaje de pérdidas escoria</i>	72
Tabla 15. <i>Porcentaje de pérdidas grava.</i>	73
Tabla 16. <i>Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino.</i>	74
Tabla 17. <i>Densidad relativa.</i>	75
Tabla 18. <i>Densidad relativa.</i>	75
Tabla 19. <i>Densidad aparente.</i>	75
Tabla 20. <i>Absorción.</i>	75
Tabla 21. <i>Dosificaciones de agregado grueso.</i>	76

Tabla 22. <i>Tamaño máximo del agregado y gradación utilizada Escoria.</i>	76
Tabla 23. <i>Requisitos del agregado grueso para bases de concreto hidráulico.</i>	76
Tabla 24. <i>Dosificaciones de agregado grueso.</i>	77
Tabla 25. <i>Tamaño máximo del agregado y gradación utilizada.</i>	78
Tabla 26. <i>Requisitos del agregado grueso para bases de concreto hidráulico.</i>	78
Tabla 27. <i>Datos de entrada para grava.</i>	79
Tabla 28. <i>Cálculos de densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción.</i>	79
Tabla 29. <i>Datos de entrada para escoria.</i>	80
Tabla 30. <i>Cálculos de densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción.</i>	80
Tabla 31. <i>Valores promedios.</i>	81
Tabla 32. <i>Asentamiento del concreto de cemento hidráulico (SLUMP).</i>	82
Tabla 33. <i>Ensayo de compresión concreto no poroso con escoria, carga máxima.</i>	85
Tabla 34. <i>Ensayo de compresión concreto no poroso con grava, carga máxima.</i>	85
Tabla 35. <i>Ensayo compresión concreto no poroso (50% grava–50% escoria), carga máxima.</i> ..	86
Tabla 36. <i>Ensayo de compresión concreto no poroso (10% arena), carga máxima.</i>	86
Tabla 37. <i>Resultados segundo diseño de mezcla ensayo de compresión concreto poroso-escoria, carga máxima.</i>	86
Tabla 38. <i>Resultados segundo diseño de mezcla ensayo de compresión concreto porosa grava, carga máxima.</i>	87
Tabla 39. <i>Resistencia máxima a la compresión por tipo de espécimen.</i>	87
Tabla 40. <i>Relación Longitud/Diámetro.</i>	88

Resumen

La relevancia del estudio del concreto poroso en la Ingeniería Civil es significativa, principalmente en la búsqueda de soluciones sostenibles y eficientes para su elaboración e implementación. En este marco, la investigación se plantea con el objetivo de evaluar los diferentes comportamientos de los concretos porosos según sus distintas composiciones. Mediante la caracterización de la muestra, no solo se examina la idoneidad de la escoria como material de agregado grueso, sino también se determinan sus propiedades mecánicas, como la capacidad de soportar compresión y la durabilidad frente al desgaste., garantizando así la calidad de dichos concretos.

El concreto poroso se considera una solución innovadora para la gestión sostenible del agua de lluvia, especialmente en áreas urbanas donde la infiltración natural se ve limitada por superficies impermeables. Este material se destaca por su alta porosidad, lo cual permite que el agua se filtre a través de él, disminuyendo el escurrimiento superficial.

Dentro de este proyecto de investigación, la escoria, un subproducto del proceso metalúrgico de purificación del acero, se utiliza debido a su estructura granular y su capacidad para mejorar la resistencia mecánica del material. Además, el uso de dicho agregado contribuye a la sostenibilidad ambiental, al reciclar un material de desecho y reducir la necesidad de extraer recursos naturales; de igual manera proporciona un manejo más adecuado a los eventos de precipitación excesiva.

Este tipo de concreto se fabrica con cemento, escoria, poca o ninguna cantidad de agregado fino y agua, resultando en un material endurecido con poros conectados que permiten una eficiente filtración del agua de lluvia.

Esta alternativa sostenible se utiliza, preferentemente en regiones de altas precipitaciones

y en áreas como estacionamientos y ciclovías lo que reduce la necesidad de sistemas de drenaje convencionales. Además, mejora la seguridad al reducir la acumulación de agua en superficies transitadas.

Palabras clave: concreto poroso, sostenibilidad, escoria, gestión del agua, resistencia mecánica.

Abstract

The relevance of the study of porous concrete in Civil Engineering is significant, mainly in the search for sustainable and efficient solutions for its elaboration and implementation. In this framework, the research is proposed with the objective of evaluating the different behaviors of porous concretes according to their different compositions. By characterizing the sample, not only is the suitability of slag examined as a coarse aggregate material, but also its mechanical properties are determined, such as compressive strength and wear resistance, thus guaranteeing the quality of said concretes.

Porous concrete is considered an innovative solution for the sustainable management of rainwater, especially in urban areas where natural infiltration is limited by impermeable surfaces. This material stands out for its high porosity, which allows water to filter through it, decreasing surface runoff.

Within this research project, slag, a byproduct of the metallurgical process of steel purification, is used due to its granular structure and its ability to improve the mechanical strength of the material. Furthermore, the use of such aggregate contributes to environmental sustainability by recycling waste material and reducing the need to extract natural resources; it also provides more appropriate management of excessive rainfall events.

This type of concrete is made with cement, slag, little or no fine aggregate and water, resulting in a hardened material with connected pores that allow efficient filtration of rainwater.

This sustainable alternative is preferably used in regions with high rainfall and in areas such as parking lots and bike paths, which reduces the need for conventional drainage systems. In addition, it improves safety by reducing the accumulation of water on traffic surfaces.

Key words: porous concrete, sustainability, slag, water management, mechanical strength.

Glosario

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials. (AASHTO, s.f.)

ACI: American Concrete Institute. (ACI, s.f.)

Agregado fino: Material pétreo e inerte de gradación contenida de 3/8plg a 0,074mm, resultado de la desintegración de rocas. (Silva, s.f.)

Agregado grueso: Material pétreo e inerte de graduación retenida por el tamiz No. 4 y proveniente de la desintegración de rocas y por la trituración de gravas. (Silva, s.f.)

ASTM: American Society of Testing Materials. (ASTM International, s.f.)

Capacidad portante: Capacidad de una estructura de pavimento de concreto permeable para soportar las cargas aplicadas, como el tráfico de vehículos. (Desdeelmurete, 2022)

Cemento Portland: Tipo de cemento más común utilizado en la fabricación de concreto poroso. (Rubi Blog, 2023)

Concreto permeable: Tipo de concreto que permite el paso de agua a través de su estructura, facilitando la infiltración de agua en el suelo, utilizado comúnmente en pavimentos y estructuras de drenaje. (Arango, s.f.)

Concreto: mezcla de cemento, grava, arena, aditivos y agua. Maleable en su forma líquida y de gran resistencia a la compresión en su estado sólido. (Redacción 360 en Concreto, s.f.)

Compactación: Procedimiento para densificar el concreto poroso después de su colocación, utilizando maquinaria o herramientas manuales. (Herogra Especiales, 2022)

Composición granulométrica: Distribución del tamaño de los agregados en el concreto poroso. (Structuralia, 2022)

Curado: Proceso de mantenimiento de la humedad en el concreto recién colocado para garantizar una adecuada hidratación del cemento y desarrollo de la resistencia. (Redacción 360 en concreto, s.f.)

Densidad: Relación entre la masa y el volumen de una sustancia. (Ondarse, 2024)

Drenaje urbano: Sistema diseñado para gestionar el agua de lluvia en áreas urbanas. El concreto permeable puede ser parte de estos sistemas para reducir inundaciones. (Vega, 2011)

Desgaste: Pérdida de material en la superficie del concreto por uso o exposición. (Solís-Carcaño & Chan-Magaña, 2020)

Durabilidad: Capacidad del concreto poroso para resistir la exposición a factores ambientales sin degradarse. (Silva, s.f.)

Escorrentía superficial: Agua de lluvia que fluye sobre la superficie del terreno en lugar de infiltrarse, lo que el concreto permeable ayuda a reducir. (Valdivielso)

Fraguado: Proceso inicial de endurecimiento del concreto debido a la hidratación del cemento, fundamental para el desarrollo de resistencia en las primeras etapas. (Redacción 360 en concreto, s.f.)

Infiltración: Proceso por el cual el agua en la superficie de la tierra entra en el suelo a razón de un volumen por unidad de tiempo. (Ciclohidrologico.com, s.f.)

Permeabilidad: propiedad del concreto que facilita el ingreso de estos agentes, estando muy relacionada a su velocidad de deterioro. Depende de su relación agua/cemento, tamaño máximo del agregado, tiempo de curado y tipo de cemento. (Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006)

Porosidad: La porosidad es una medida del volumen total de los poros que se encuentra en la estructura interna del concreto endurecido; depende de su relación entre el agua y el cemento

(A/C), el grado de hidratación del cemento, el volumen de aire atrapado y las proporciones entre los agregados fino y grueso. (Solis-Carcano & Alcocer-Fraga, 2019)

Reducción de escorrentía: Disminución del agua superficial debido a la capacidad del concreto poroso de absorberla. (Torres & Vega, 2022)

Relación agua-cemento: Parámetro que relaciona el agua y el cemento en una mezcla de concreto expresada como un cociente de esta y que está directamente ligada a la resistencia del hormigón. (Argos, s.f.)

Relación de vacíos: Volumen de un suelo no ocupado por partículas sólidas. Cuanto mayor sea, más suelto será el suelo. (Duque Escobar & Escobar P., 2016)

Resistencia a la tracción: Capacidad del concreto poroso para resistir fuerzas que tienden a estirarlo. (Instituto de Construcción y Gerencia, 1994)

Resistencia a la abrasión: Capacidad del concreto poroso para resistir el desgaste superficial. (Instituto Mexicano del cemento y del concreto, 2007)

Resistencia mecánica: Capacidad general del concreto poroso para soportar diferentes tipos de fuerzas. (Osorio, s.f.)

Sedimentación: Acumulación de partículas sólidas, como polvo o tierra, dentro de los poros del concreto permeable, lo que puede reducir su capacidad de drenaje con el tiempo. (HSA Henan Superior Abrasives, s.f.)

Sostenibilidad: Impacto positivo del concreto permeable en el medio ambiente, ya que contribuye a la recarga de acuíferos y la reducción de la escorrentía superficial. (Argos, s.f.)

Vibración: Técnica utilizada para compactar la mezcla de concreto, mejorando su resistencia. (Argos, s.f.)

Introducción

El interés por desarrollar alternativas sostenibles como el concreto poroso, surge debido a la necesidad de reducir el impacto ambiental aprovechando un subproducto generado por la industria metalúrgica. La utilización de concreto poroso o permeable es una elección factible para este propósito y la incorporación de escoria para proporcionar apoyo a sus propiedades, llama el interés de los ingenieros para buscar soluciones que generen reducir la huella de carbono en los pavimentos rígidos.

La expansión urbana conlleva hacia un crecimiento de la infraestructura, lo que provoca la pérdida de áreas naturales y altera el ciclo natural del agua. Además, el uso excesivo de superficies impermeables ha dejado a las ciudades con el desafío de gestionar el aumento del volumen de escorrentía, la erosión de suelos susceptibles a inundaciones y la degradación de la calidad del agua.

El concreto permeable se reconoce como un método efectivo para recuperar la funcionalidad ecológica en entornos urbanos, lo que lo convierte en una de las tecnologías de pavimentación con mayor potencial.

Por otra parte, referente al material de investigación, en Colombia, el acero es un recurso clave para la industria metalúrgica y otros sectores económicos que impulsan el crecimiento y el desarrollo, como la construcción de infraestructura, debido a que sus propiedades le brindan una ventaja competitiva en comparación con otros materiales, como su resistencia mecánica.

(Restrepo & Taborda, 2017; Cámara Colombiana de la Construcción, CAMACOL, 2022).

Desde este enfoque, las empresas que operan en estos sectores de negocio enfrentan constantemente diversos retos originados por las dinámicas y tendencias del mercado global, como la necesidad de adoptar un compromiso con prácticas más sostenibles y su

implementación estratégica. (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2023; Comando Construcciones, 2024), uno de los principales problemas asociados a la producción de acero es el impacto ambiental causado por subproductos residuales como las escorias. Se producen entre 180 y 230 kg por tonelada de acero (Sánchez, 2016; Suárez, 2018).

En consecuencia, la investigación y análisis de las propiedades mecánicas de mezclas de concreto con escorias de la fundición de acero en altos hornos representa un avance en el conocimiento, ya que este material tiene un gran potencial, pero no ha sido estudiado, sino que también son una valiosa contribución para la industria metalúrgica, de pavimentos y de construcción en Colombia.

En países desarrollados como Estados Unidos, Suiza y Alemania, ya se ha implementado el uso de escorias de acero para la construcción de carreteras, reemplazando el agregado natural utilizado de manera convencional (Nguyen, Sebaibi, Boutouil, Leleyter, & Baraud, 2014). Su adopción en un país emergente como Colombia podría ser un logro importante con impactos directos e indirectos en la economía nacional, competitividad industrial en los mercados globales, desarrollo productivo y social, y cumpliendo los compromisos relacionados con la protección ambiental (Flores & Garamendi, 2022).

Es esencial que este proyecto de investigación se ajuste a las normativas actuales, garantizando su completo cumplimiento para asegurar que esta innovación pueda aplicarse de manera estandarizada en futuras actividades de construcción.

1. Problema de investigación

1.1 Planteamiento del problema

En Colombia, durante la temporada de invierno, la infraestructura vial recibe grandes niveles de precipitaciones, la normativa colombiana establece que debe construirse un sistema de drenaje que ayude a canalizar el agua hacia el alcantarillado. Sin embargo, en varias locaciones no cuentan con este recurso.

Esta situación es perjudicial para la comunidad porque la ausencia de un sistema de drenaje podría causar problemas de estancamiento de agua, sumándole el tránsito de vehículos indeseados en el diseño, puede ocasionar que los pavimentos fallen, presenten fisuras y grietas. Esto genera gastos de mantenimiento en las estructuras dañadas y una reducción en la adherencia entre los neumáticos y el pavimento.

La utilización de materiales convencionales en las diferentes mezclas, principalmente de tipo asfáltico, han generado un deterioro significativo sobre todo en el ámbito medio ambiental de los distintos lugares donde se llevan a cabo los procesos de extracción y/o elaboración de dichas materias primas, debido a la sobreexplotación de recursos naturales que en muchos casos son no renovables, impactos completamente negativos que repercuten hasta en las mismas sociedades donde se llevan a cabo dichas actividades.

Los pavimentos ecológicos, son una alternativa diseñada para el revestimiento de vías, senderos, parqueaderos, garajes, entre otros; con el fin de aportar mejores características de durabilidad, rigidez, permeabilidad y estabilidad al suelo de estos lugares, haciendo un mejor control de los factores que los puedan llegar a afectar. Con respecto al asfalto que se tiene hoy, los ecológicos aportan mucho la mitigación de los daños ocasionados al medio ambiente y contribuyen a la no alteración de los ecosistemas donde se implementarán.

Esta clase de pavimento es conocido como “hormigón ecológico”, el cual está compuesto por un concreto con una alta porosidad, que lo hace muy permeable, facilitando el flujo de las aguas lluvias al suelo, mitigando así factores desfavorables en los entornos donde va a ser implementado. La escoria es un producto que en su mayor parte es desechado por la industria metalúrgica, debido a la gran cantidad de estos residuos que no son reutilizados y al estar acumulados en vertederos se genera una significativa contaminación; es por esto por lo que la factibilidad de incluir este material residual de acero para una mezcla asfáltica desde el punto de vista técnico y ambiental toma una relevancia importante. Con el uso de este material residual en agregados para mezclas de hormigón se busca una alternativa ambientalmente responsable que pueda sustituir ciertos tipos de materiales convencionales, los cuales causan grandes daños al medio ambiente en su elaboración y que con el tiempo se están volviendo recursos no renovables.

1.2 Pregunta de investigación

¿Puede la escoria de alto horno derivada de procesos metalúrgicos para la purificación del acero, mediante la caracterización de sus propiedades mecánicas y físicas, utilizarse como agregado en mezclas de concretos porosos, para su uso en la prevención en áreas urbanas?

1.3 Justificación

La producción descontrolada de diversos tipos de residuos se ha incrementado en las últimas décadas, por factores como el desarrollo industrial y económico global, lo que ha generado un complejo desafío ambiental mundialmente, por el uso inadecuado de estos materiales residuales. En los últimos años la industria metalúrgica, por sus distintas técnicas de purificación, aleación y tratamientos de diferentes tipos de metales, se generan aproximadamente

200.000 toneladas de escoria secundaria por año en Colombia, estos mecanismos son fundamentales para la creación de diversos componentes que son utilizados por las principales industrias que constituyen las economías locales, nacionales y mundiales. Este estudio se centra en la caracterización, disposición final para segundo uso y actividades que permitan la reutilización de distintas escorias para usarlas en ámbitos constructivos, contribuyendo con la conciencia ambiental requerida en el ámbito de la construcción, una de las que más residuos e impactos negativos tiene, ya sea en la elaboración de los materiales requeridos en los distintos propósitos, y no en los diversos procesos realizados.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la viabilidad del uso de escoria como agregado en mezclas de concreto poroso y así determinar sus respectivas propiedades mecánicas en la construcción de pavimentos.

2.2 Objetivos específicos

1. Determinar el material de agregado grueso más competente, entre la escoria y la grava, para desarrollar un tipo de concreto que garantice una alta porosidad y permita la permeabilidad.
2. Recopilar y examinar la información bibliográfica proveniente de publicaciones avaladas y revisadas por organismos académicos.
3. Desarrollar ensayos que permitan cuantificar las propiedades físicas y mecánicas del concreto poroso considerando variables en sus composiciones.
4. Analizar las distintas aplicaciones que podría llegar a tener el concreto permeable con agregado de escoria en diferentes ámbitos urbanísticos.

3. Estado del arte

3.1 Perspectiva internacional del concreto poroso

Para abordar y entender adecuadamente el término de concreto poroso, es imperativo investigar sobre su implementación bajo contextos como el económico, el ambiental, el punto de vista de la ingeniería civil y de la estructura como tal del concreto poroso. En concordancia a Chandrappa & Biligiri (2016). Últimamente, el hormigón poroso usado a modo de material de pavimento en ámbitos para tipo vial de tráfico liviano ha ganado reconocimiento gracias a sus aspectos medioambientales positivos. Debido al mayor uso de hormigón permeable en la industria del pavimento y debido a sus numerosos beneficios, existe un amplio margen para realizar más investigaciones para comprender mejor el material, lo que lo convertirá en un material prometedor para carreteras sostenibles en el futuro.

De igual manera, Xie et al., (2019) comenta que el rendimiento hidráulico de los PCP (Permeable Concrete Pavements o en español Pavimentos De Hormigón Permeable) está determinado por su diseño de mezcla, diseño del pavimento, práctica de construcción y entorno de servicio. En general, es difícil optimizar simultáneamente las propiedades mecánicas y de durabilidad y el rendimiento de infiltración de los PCP. Se necesitan desarrollar nuevas tecnologías para ayudar a mejorar la durabilidad de los PCP sin incrementar la necesidad de su mantenimiento o disminuir sus beneficios de infiltración.

Este autor también nos presenta las más importantes ventajas ambientales del uso de pavimentos hechos con concreto poroso, en cuanto a disminución de la escorrentía de Aguas lluvias, mejoramiento en la calidad de las aguas subterráneas, reducción del efecto isla calor y también mejoras en cuanto al deslizamiento presentado durante las lluvias en las carreteras.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado los pavimentos contruidos de hormigón permeable ostentan determinadas cualidades que resultan de un importante interés para avanzar a estrategias con las cuales se puedan transformar estructuras y composiciones urbanas desde la superficie.

Comenta Rahman, Northmore, Henderson, & Tighe, (2015) que hay muchos beneficios asociados con el pavimento de hormigón permeable, como ayudar con la filtración de agua, absorber metales pesados y reducir la contaminación. El aspecto más significativo, que atrae la atención de las agencias ambientales y las ciudades y municipios, es su capacidad para reducir la escorrentía de aguas pluviales. El hormigón permeable se encuentra catalogado como la solución principal para la gestión de aguas lluvias por la mayoría de las agencias de vigilancia ambiental en Estados Unidos. Hay barreras para la implementación de la tecnología, ya que los diseñadores no siempre están bien informados de las diversas consideraciones de diseño funcional y estructural, sin embargo, se adelanta un sistema de referencia para evaluar de qué manera se puede integrar dicho material a infraestructuras viales de tráfico liviano.

Zhu, Yu, Zhu, Lu, & Cao (2019). afirma que el hormigón poroso puede reducir parte de la escorrentía superficial y el pico de inundación y puede retrasar el momento pico. La carretera permeable tiene un mejor efecto en la reducción del coeficiente de escorrentía y el pico de inundación, lo que puede reducir eficazmente la presión del drenaje urbano y reducir el riesgo de inundación por aguas pluviales, por lo cual el concreto poroso es tenido en cuenta para el cálculo del desarrollo de bajo impacto (LID - Low Impact Development), el cual sirve para reducir el factor de escorrentía en las superficies urbanas y por tanto las inundaciones consecuentes. Esto es útil debido a que es imperativo adelantar protocolos que ayuden en el progreso de las

superficies en las ciudades debido al crecimiento exponencial de las zonas urbanas y el problema de la impermeabilización de las mismas.

Por último, Saadeh, Ralla, Al-Zubi, Wu, & Harvey, (2019) finalizan comentando que los pavimentos completamente permeables se caracterizan por ser aquellos en los que todas las capas son permeables y la estructura del pavimento sirve como un reservorio para recolectar agua y disminuir los impactos negativos de las lluvias, también se estableció que es posible desarrollar y efectuar un diseño de pavimento completamente poroso como parte de un punto de vista sustentable para las vías de bajo flujo vehicular.

En cuanto a lo referente al diseño de mezclas para Concretos Permeables resulta importante tener conocimientos acerca de los diferentes comportamientos propios de dichos materiales, algunas de estas particularidades que se plantean como la poca resistencia o características elásticas, se ven influenciadas en gran medida por la alta porosidad presente en su estructura interior (Sun, 2013). Para una óptima utilización de este tipo de material (Deo & Neithalath, 2011) resaltan que es esencial comprender el comportamiento mecánico de los concretos porosos en función de la caracterización de los materiales y los parámetros internos en cuanto a la composición de los poros, se ha descubierto que la energía compresiva absorbida por las muestras de hormigón permeable aumenta exponencialmente junto con la resistencia a la compresión, esto puede relacionarse con la porosidad y los tamaños críticos de poro en el material.

Autores como Chandrappa & Biligiri, (2017) y Kim, Gaddafi, & Yoshitake, (2016), han llevado a cabo diversos análisis para denotar el uso efectivo de dicho material teniendo en cuenta la función de su diseño, su composición y de los parámetros estructurales de los poros, para de esta manera poder suministrar un pronóstico más competente de la conducta del material en

función a la porosidad y poder anticipar el fenómeno del desgaste mediante modelos de laboratorio que representan la fatiga inducida por el flujo vehicular.

Bhutta, Tsuruta, & Mirza, (2012) propone que las pruebas de laboratorio más adecuadas para la realización de este hormigón son: asentamiento, asentamiento-flujo, relación de vacíos, coeficiente de permeabilidad, resistencias a la compresión y flexión y velocidad de desarrollo de la resistencia. Además, propuso un ensayo para establecer los efectos de los aditivos reductores de agua y/o espesantes (cohesivos) utilizados en la compactación del concreto poroso de alto rendimiento. Para complementar, Tang, Cheng, & Tsai, (2019) describe que uno de los factores más importantes en el hormigón poroso está relacionado de manera cercana con el agregado cementante, en ese orden de entendidos los parámetros más relevantes para mejorar las características de estos materiales son mediante el diseño de mezcla y la técnica de compactación.

Por último (Zhong & Wille, 2015) resalta que la urbanización continua y el crecimiento demográfico fomentan el crecimiento de las áreas urbanas impermeables, lo que genera impactos ambientales y sociales adversos preocupantes. El hormigón permeable tiene un potencial notable para contrarrestar estos impactos adversos al tiempo que proporciona la integridad estructural necesaria, lo que respalda la urbanización continua. Se podría lograr una aplicación más amplia del hormigón permeable mediante una mayor resistencia al desmoronamiento y un mejor rendimiento de durabilidad. En los últimos años, se han creado nuevas tecnologías para aumentar la durabilidad de los pavimentos de concreto permeable, sin que aumenten sus necesidades de mantenimiento, ni comprometan sus características de infiltración. Sin embargo, el uso de concreto permeable por ejemplo en vías de tráfico pesado sigue siendo restringido,

principalmente por tres retos: su baja resistencia, su susceptibilidad a la obstrucción y problemas relacionados con el desgaste y con la durabilidad.

3.2 Concreto poroso en Colombia

En Colombia el término concreto poroso o permeable surgió hacia los años 2000, el cual, es implementado en todos los ámbitos de la construcción, incluidas las tecnologías ambientales, están involucrados. Según la norma del Instituto Americano del Concreto (ACI, 2010) un pavimento permeable se describe como aquel que, constituido por un material con una estructura de poros conectados, lo que permite que el agua se filtre correctamente desde la superficie hacia las capas inferiores. Cuando el concreto poroso tiene esta red interna de vacíos, facilita el paso del agua, reproduciendo su ciclo natural, de esta manera permitiendo su almacenamiento y posible reutilización.

Aunque el concreto poroso es un sistema de drenaje eficaz, no ha tenido buena aceptación por los usos limitados que este material puede proporcionar en la construcción. La empresa Argos, una de las más importantes a nivel nacional y siendo pionera en cuanto a el avance del tema de tecnologías sustentables, realizó bajo la iniciativa “comunidad 360° en Concreto” el diseño y la implementación de un espacio de prueba para un pavimento poroso el cual se desarrolló en el área de parqueaderos de la Universidad EAFIT ubicada en Medellín, con un área de desagüe aproximadamente de 690 metros cuadrados, el volumen de hormigón permeable utilizado fue de 3.2 metros cúbicos y la tasa de infiltración determinada fue de 160.5 L/s. (Argos & Arango, 2016)

En 2015 se introdujo el término "pavimento permeable de colores", lo que refleja el avance en nuevas tecnologías relacionadas con el uso del concreto poroso. Este tipo de pavimento combina dos elementos clave: sostenibilidad y diseño, y se aplica principalmente en áreas donde la innovación en concreto ofrece soluciones a problemas específicos. Debido al éxito de las pruebas realizadas con este pavimento permeable, su uso se ha extendido a glorietas y parques municipales en ciudades como Cartagena, Cali y Barranquilla.

En el futuro, los pavimentos permeables, formarán parte de un programa integrado de transporte sostenible. Cuando se diseñan adecuadamente se pueden utilizar como una práctica de gestión alternativa recomendada para la gestión de la escorrentía de aguas pluviales. Desde un punto de vista práctico, estos materiales deben mantener características específicas durante toda su vida útil, tales como: tener una capacidad de depósito de subrasante adecuada para capturar el volumen de escorrentía, el pavimento de la superficie debe permanecer altamente permeable y sin obstrucciones, permitir una permeabilidad mínima del suelo de la subrasante para infiltrar la escorrentía capturada y asegurar que no haya un impacto adverso en las aguas subterráneas (Kayhanian, Li, Harvey, & Liang, 2019). Según la investigación realizada, se sabe que los hormigones permeables presentan desventajas, pero son más las ventajas que proporcionan en la gestión de las aguas lluvias, por eso se están llevando a cabo nuevas tecnologías para aumentar sus características mecánicas y su durabilidad.

Una de las desventajas del concreto permeable es asociada con la resistencia, que se ve reducida debido a la elevada porosidad, las mezclas de concretos porosos actualmente no pueden usarse en estructuras para pavimento vial, especialmente para vías de tráfico pesado. Contrario de las amplias ventajas que ostentan los pavimentos permeables, estos materiales de igual manera acarrearán ciertas desventajas, como lo indica (López, Píalarissi, Pujadas, & Aguado,

2017). El concreto poroso ha atraído más atención en la industria del hormigón en pro de la protección ambiental y la sostenibilidad. Debido a una porosidad del 15-30% y una permeabilidad de 1,4-12,4 mm/s, el concreto poroso puede infiltrar aguas pluviales y reducir el volumen de escorrentía. Sin embargo, por la misma razón dicho material es estructuralmente más débil y menos duradero que el hormigón convencional. En general, la resistencia a la compresión de los concretos permeables varía de 2,8 a 28 MPa, que es inferior a la del hormigón convencional de 17 a 40 MPa.

Colombia ha avanzado en regulaciones y normas relacionadas con pavimentos permeables de concreto. Actualmente existen Consultas que apoyan el desarrollo de políticas de gestión de aguas pluviales en zonas urbanas. Además, existe un proyecto de decreto sobre drenaje urbano que incluye pavimentos permeables, y el POT prevé seis artículos que regulan el uso de estos materiales (Artículo 229). Por otro lado, en Medellín (EPM y Alcaldía) y Barranquilla (AGBAR) se trabaja en planes maestros de drenaje urbano, alineados con sistemas de drenaje urbano sostenible (Argos & Arango, 2016).

3.3 Uso de la escoria en el concreto poroso

Durante la investigación para este proyecto se encontraron distintos referentes internacionales que han estudiado el uso de la escoria producida en el proceso de purificación del acero en la industria metalúrgica, como agregado en la fabricación de concreto permeable a través del análisis y la evaluación de sus propiedades.

Reporta Coppola, Buoso, Coffetti, Kara, & Lorenzi, (2016) en los resultados su investigación que el porcentaje máximo de agregado natural que se puede reemplazar con escoria es de aproximadamente el 15% para limitar la dosis de superplastificante necesaria para alcanzar

la misma clase de trabajabilidad de la mezcla de hormigón. Cuanto mayor fue el porcentaje de escoria granulada, mayor fue la densidad, el módulo elástico en compresión y su resistencia. El encogimiento en seco del concreto aumentó al agregar una mayor cantidad de escoria. También añadió que los agregados de escoria exhibían mayor densidad que los naturales debido a que tenían un mayor contenido de hierro, por lo cual, a mayor cantidad de escoria mayor era la densidad del concreto también. Así mismo, en lo que se refiere a la escoria, se determinó una mayor absorción de agua, bajos contenidos de sulfatos, azufre y cloruros solubles, ausencia de yeso, sílice amorfa, pirita, lodos y arcillas.

En dicho estudio se analizaron las propiedades mecánicas en los estados fresco y endurecido para diversas mezclas de concreto fabricadas con escoria como agregado granular en reemplazo parcial de los agregados naturales que convencionalmente se emplean para ello. En esa línea, su metodología se basó en la preparación de una serie de mezclas experimentales usando tres tipos de agregados naturales y tres tipos diferentes de residuos granulares o escoria (arena fina, grava fina y grava gruesa).

Los resultados obtenidos del concreto en estado fresco arrojaron que entre mayor fuera la cantidad de agregados de escoria, menor era la trabajabilidad inicial, lo cual se asoció con la textura granular de la escoria triturada y su mayor absorción de agua que conllevaba al consumo del agua en la mezcla. De igual manera, se concluyó que la mejor proporción de escoria como agregado en el concreto era del 15% para evitar la pérdida de trabajabilidad, pese a que ello implicaba un incremento en la dosis de súper plastificante (y de aire atrapado como efecto secundario, >2%).

Por otro lado, se observó en el concreto endurecido que, a mayor contenido de escoria, mayor era la resistencia a la compresión frente al concreto de referencia, excepto cuando solo había transcurrido 1 día pues el súper plastificante generaba un efecto retardante. La resistencia a la flexión y a la tracción presentaron una mejoría moderada, lo cual se relacionó con la textura rugosa de los agregados de escoria que repercuten en la zona de transición interfacial agregado - matriz cementante. El módulo de elasticidad incrementó a su vez que se aumentaba la cantidad de escoria, pero el aumento no fue el esperado debido a que la mezcla adquirió una mayor densidad. Por consiguiente, se concluye en dicha investigación que no es recomendable usar un porcentaje máximo del 15% de escoria como reemplazo de agregados naturales para de esta manera poder acceder a sus beneficios y evitar vulnerabilidad estructural, cargas muertas y propensión a fisuras con respecto a los concretos convencionales.

Continuando con la investigación se encontró que Gonzáles-Ortega et al. (2019) realizaron su trabajo investigativo fundamentándolo en la evaluación de la durabilidad, la estabilidad y la posibilidad de contaminación de los concretos que se fabrican con escorias. Se utilizaron mezclas con agregados de piedra caliza y barita como referencia para aplicaciones estructurales y de peso, respectivamente.

Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión, módulo elástico, penetración de agua bajo presión, ciclos húmedo - secos, ciclos de congelación - descongelación, influencia de las condiciones ambientales y lixiviación; las mezclas de concreto con agregados de escoria presentaron mayor absorción de agua y reducción de agregados finos y su densidad promedio (2.800 kg/m³) fue un 20% mayor a la de las mezclas con caliza, pero un 17% más baja que las mezclas con barita. En cuanto a la resistencia a la compresión, las mezclas con caliza y escoria tuvieron valores similares y mayores a los obtenidos para las mezclas con barita, aunque las

variaciones se asociaron con el contenido de aire: a mayor contenido de aire, mayor porosidad y menor resistencia.

Concluyendo así que los resultados indican que la escoria tiende a presentar mayor profundidad de penetración de agua bajo presión, una expansión ligeramente mayor, mayor profundidad de carbonatación y resistencia a la compresión similar a la piedra caliza por otra parte las evidencias aportadas en este estudio indican que, si se trata adecuadamente, la escoria puede utilizarse como agregado para la producción de hormigón en aplicaciones con baja responsabilidad estructural. De hecho, la durabilidad, la estabilidad a largo plazo y la contaminación potencial evaluada para el hormigón con la escoria utilizada en este trabajo cumplen con los requisitos de los hormigones estructurales típicos. (Coppola, et al, 2016)

Tamayo, Pacheco, Thomas, de Brito, & Rico, (2020) comenta que la búsqueda de materiales de construcción más sostenibles, capaces de cumplir con los estándares de calidad y las políticas de innovación actuales, orientadas al ahorro de recursos naturales y a la reducción de la contaminación global, es uno de los mayores retos de la sociedad actual. Esta investigación se centra en el estudio de los efectos que conllevaba el uso de escoria como reemplazo de los agregados naturales en la fabricación de concretos en el marco de la innovación, la sostenibilidad y el reciclaje de residuos industriales para mitigar el impacto ambiental que generan estas escorias son un subproducto de la industria siderúrgica y su utilización, que evita el uso de áridos naturales, es una nueva tendencia en la tecnología de hormigones y pavimentos. En este trabajo se han investigado los efectos de la incorporación de este tipo de material en hormigones en varios niveles de sustitución (0%, 20%, 50% y 100% en volumen), mediante la caracterización física, mecánica y de durabilidad de las mezclas. El análisis de los resultados ha permitido establecer los beneficios e inconvenientes de estos nuevos materiales, comparándolos con los de

una mezcla de hormigón de áridos naturales con un 0% de incorporación de escoria y con los datos disponibles en la literatura para hormigones elaborados con este elemento más habituales a partir de residuos de construcción y demolición. También se observaron ligeros aumentos de la densidad aparente superiores al 7% para la sustitución total y en general, se han obtenido propiedades mecánicas y de durabilidad funcionalmente buenas.

Por su parte Sánchez, (2016) comenta que las escorias son desechos de la elaboración del acero, cuyo material principal es la chatarra. Dichas escorias en Colombia presentan una alta producción, ya que de cada tonelada producida de acero se generan de 0,1 a 0,3 toneladas de escorias, aproximadamente. Las altas cantidades de ENHAE indican que la producción de estos residuos en el país es importante, por lo cual debe indagarse al respecto para darles un uso técnico y sostenible adecuado, más aún si se tiene en cuenta que la disposición de dichas escorias generan impactos ambientales sobre el suelo y que las necesidades existentes de materiales seleccionados para la construcción de carreteras son altas. Desde 1956, en casos específicos, se usan escorias negras en carreteras, sin profundizar en esa época más allá del uso particular que le dieron en su estudio técnico. Muchas de estas escorias negras pueden tener algo de potencial expansivo, lo que debe llevar, a quienes las usen, a generar procesos para su control; e no hacerlo, esto sería desfavorable para el caso de la estabilidad de suelos y estructuras de pavimentos.

Mayor, Valderrama, Rojas, Benavides, & Prado, (2020) habla de que el aumento de la población mundial ha consumido más recursos, lo que hace que la construcción sea esencial por la demanda de más viviendas, la expansión de infraestructuras viales y el desarrollo de comercio e industria. El acero es uno de los materiales más utilizados en este ámbito y su producción genera diversos residuos dependiendo de la materia prima empleada. Al producirse a partir de

chatarra, se genera escoria y durante el proceso de refinado en el horno tipo cuchara, se obtiene escoria blanca. Es importante señalar que, por cada tonelada de acero producida, se generan entre 110 y 150 kg de escoria. Actualmente, este residuo es almacenado por la industria, lo que resalta la necesidad de investigar su uso seguro para prevenir impactos negativos en el medio ambiente. Por ello, este estudio tiene como objetivo evaluar el uso de la escoria como agregado en la fabricación de morteros estructurales. Se desarrolló una metodología experimental que incluye una revisión del estado del arte sobre el uso de agregados siderúrgicos, la determinación de los materiales (cemento, agregado natural de río y agregado siderúrgico), el diseño de mezclas para alcanzar una resistencia a la compresión de 35 MPa, y la fabricación de morteros de referencia y con agregado siderúrgico, además de la evaluación de sus características en estado fresco y endurecido (resistencia a la compresión y a la flexión). Los resultados indican que el uso del agregado siderúrgico fino a partir de escoria mejora las propiedades mecánicas del mortero, lo que puede atribuirse a su alta resistencia al desgaste y su superficie rugosa que favorece la adherencia. Se concluye que la escoria puede ser una alternativa viable como reemplazo del agregado natural en la producción de morteros y concretos, contribuyendo así a la sostenibilidad en la industria de la construcción al reducir la explotación de recursos naturales no renovables.

3.4 Proceso siderúrgico en la industria del acero

Según (Suárez, 2018) El acero es el material de construcción por excelencia, gracias a sus posibilidades de obtención de grandes resistencias mecánicas manteniendo aún buena ductilidad. La resistencia es necesaria para asegurar el soporte a las cargas exigidas y la ductilidad flexibiliza los métodos de transformación del acero y menos posibilidad de colapso en casos de altísima exigencia, como en el momento de un sismo.

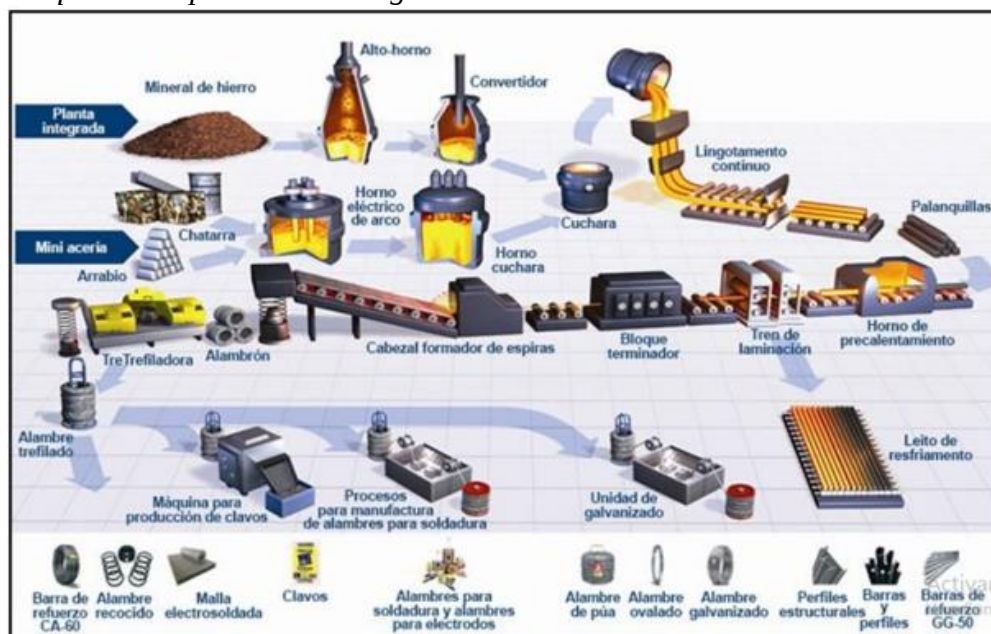
Las propiedades del acero dependen de su composición química y de los procesos de transformación, por lo que cada etapa del proceso de obtención del acero, llamado proceso siderúrgico, es de vital importancia para obtener un producto que cumpla con las propiedades especificadas para cada uso.

Por otro lado, (Suárez, 2018 cita a Ciriza, 2013 en evaluación de escorias siderúrgicas en mezclas de concreto estructural) describe que el proceso siderúrgico se divide en cuatro partes:

- Reducción: fabricación de arrabio o hierro esponja a partir de mineral de hierro. Es realizado en altos hornos o reactores de reducción directa, transformando los óxidos constituyentes del mineral en hierro metálico.
- Fusión y afino: en esta etapa se obtiene el acero mediante la purificación del arrabio líquido en convertidores al oxígeno (proceso BOF/LD) o por la fusión y afino de chatarra ferrosa y/o hierro esponja o arrabio sólido, realizada en hornos de arco eléctrico (EAF/LF).
- Solidificación: una vez el acero líquido cumple con la composición química y pureza requerida, es llevado al estado sólido en Máquinas de Colada Continua para formar tochos y palanquillas, o mediante moldes para obtener lingotes o piezas fundidas.
- Conformación mecánica: en esta etapa el acero es llevado a su forma final mediante procesos de laminación, la que puede ser en caliente o en frío, forja, figuración.

Durante estos procesos se pueden aplicar tratamientos térmicos y superficiales para obtener propiedades específicas de dureza, resistencia, ductilidad, maleabilidad y tenacidad.

Figura 1. Esquema del proceso siderúrgico.



Adaptado de (Ciriza, 2013).

Cuando el proceso siderúrgico parte desde el mineral de hierro se denomina “Proceso Integrado”. Por otra parte, si la materia prima es esencialmente chatarra, se dice que el proceso es “Semi integrado”. (Suárez, 2018).

3.5 Obtención y clasificación de las escorias

(Suárez, 2018) comenta en su investigación que las escorias metalúrgicas son soluciones o mezclas no metálicas de óxidos, formadas a altas temperaturas a partir de fundentes e impurezas que, por ser menos densas e insolubles en el metal, flotan sobre el baño metálico.

Mayor et al. (2020) afirma que la escoria es un residuo de inevitable generación cuando se fabrica el acero. De modo general existen dos tipos según su proceso de producción: las escorias de hierro (extracción de recursos naturales - mineral de hierro) y las escorias de acero (de material de reciclaje o chatarra). Estas últimas se clasifican en: Escoria de Horno de Arco Eléctrico (EHAE) o negra, la cual es producida en la etapa de fundición de la chatarra; Escoria

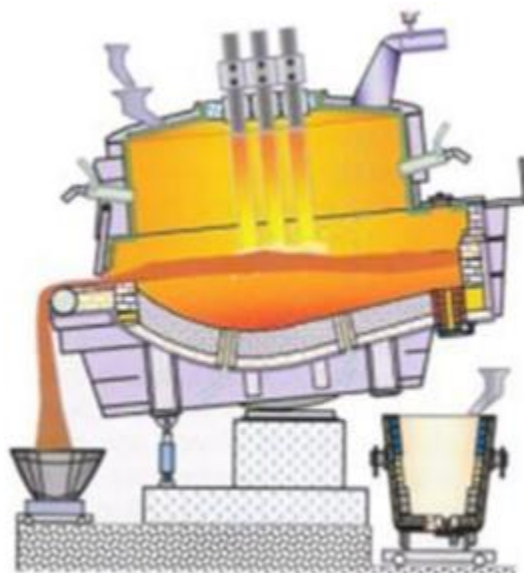
de Horno de Cuchara (EHC) o blanca, producida en la etapa de afinado; y Escoria de Horno Básico de Oxígeno (EHBO). Pocos estudios se encontraron sobre el uso de la EHAE como agregado fino y/o grueso en la fabricación de concreto o de mortero. Su principal limitación se debe al hecho de que la escoria es inestable volumétricamente, pues puede sufrir expansión por la reacción de compuestos no deseados. Sin embargo, se ha demostrado que mejora propiedades mecánicas.

Continuando con (Suárez, 2018) nos define que en el proceso de fabricación del acero se producen varios tipos de escorias, dependiendo de las rutas de fabricación, como son: escorias de alto horno, escorias de horno fusión a arco eléctrico, escorias de horno cuchara y cada tipo de escoria presenta diferentes características en cuanto a composición y naturaleza, de las cuales dependen las posibilidades para su posterior uso. Por lo anterior se tiene la siguiente clasificación de escorias:

- Escorias de alto horno: provienen del proceso de reducción de minerales de hierro al producto metálico denominado arrabio. En este proceso se utiliza, además de mineral de hierro, carbón coque, cal, caliza o dolomía, los cuales reaccionan a temperaturas de hasta 1600 °C y generan escoria en proporciones similares a las del arrabio producido. Dadas las propiedades hidráulicas y composición, las escorias de alto horno se usan para fabricar cemento, como agregado fino y grueso o como material cementante suplementario para fabricar elevado contenido de fase vítrea. Suele ser mayor al 80% y varía, dependiendo del modo de enfriamiento, que puede ser en aire, aire comprimido o agua. La fase vítrea está directamente relacionada con las propiedades hidráulicas de la escoria. (Suárez, 2018)

- Escorias de arco eléctrico: La obtención de acero por el proceso semi integrado utiliza chatarra ferrosa como materia prima, la cual es fundida en hornos de arco eléctrico. Además de la chatarra, en el horno se adicionan cales de tipo cálcica y dolomítica, las cuales, al fundirse, forman la escoria (EAF), rica en óxidos de calcio, magnesio y silicio. Ya que en el proceso se adiciona oxígeno y antracita como aportantes de energía química y para generar la llamada escoria espumosa, requerida para proteger los equipos de la radiación del arco, la escoria contiene óxido de hierro en proporciones que van desde 20% hasta 40%. El óxido de hierro es el responsable del color negro característico y de ahí su nombre “escoria negra”, como también es conocida.

Figura 2. *Retirada de escoria en el horno eléctrico.*



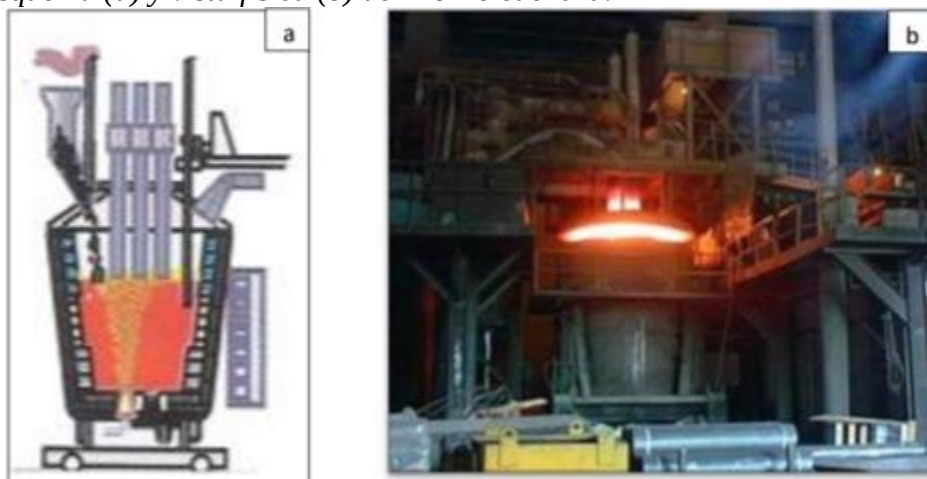
Fuente: (Suárez, 2018)

Luego de retirada la escoria negra del horno fusión (figura 2), es llevada a los patios donde es enfriada al aire o con ayuda de agua. Las características finales de la escoria en cuanto

a composición química y mineralógica dependerán del proceso metalúrgico realizado en el horno y de la velocidad de enfriamiento. (Suárez, 2018)

Escoria de horno cuchara: Después del proceso de fusión y afino primario, el acero es vaciado en un recipiente, comúnmente llamado cuchara, para ser transportado a una estación de calentamiento por arco eléctrico, con el fin de mantener la temperatura adecuada del acero. El conjunto de cuchara más estación se denomina horno cuchara. La escoria del horno cuchara, además de realizar el proceso de desulfuración del acero, también protege el equipo, evita pérdida de temperatura y la re-oxidación del acero. Al reducirse la cantidad de óxidos de hierro y manganeso, el color de la escoria es mucho más claro y por eso se conoce como escoria blanca. (Suárez, 2018).

Figura 3. Esquema (a) y vista física (b) del Horno cuchara.



Fuente: (Suárez, 2018)

3.6 Dosificación y diseño de un concreto poroso

Para iniciar con este apartado en primer lugar se hará una determinación de lo que es una mezcla convencional de concreto y sus composiciones, empezando con Porrero et al. (2014) que,

en su libro, manual del concreto estructural, define que el concreto también conocido como hormigón es un material que se puede considerar constituido por dos partes: una pasta moldeable capaz de endurecerse con el tiempo y por otro lado un agregado de trozos pétreos. De la misma manera dicha pasta está compuesta por agua y un producto aglomerante o conglomerante comúnmente conocido como cemento; por otra parte, el agua cumple con la función de dar fluidez a la mezcla y reaccionar con el cemento dando, así como resultado el endurecimiento del material. A veces, se le añade aditivos que son sustancias con las que se busca darles ciertas propiedades especiales al concreto y puede contener aire atrapado natural o intencionalmente.

Por otra parte (Matallana, 2023) en su libro, El concreto. Fundamentos y nuevas tecnologías, comenta que El concreto es considerado por la Real Academia de la Lengua como un término que viene del inglés “concrete” y lo refiere al hormigón, definiéndolo como: “Material que resulta de la mezcla de agua, arena, grava y cemento o cal, y que, al fraguar, adquiere más resistencia”. En Colombia fue adoptado el término “concreto”, y en general en Latinoamérica, básicamente por la influencia de los textos norteamericanos. El concreto se puede considerar como una roca artificial elaborada por el hombre, que aprovecha sus propiedades de resistencia y durabilidad en la construcción.

En la siguiente Tabla 1 se puede evidenciar el porcentaje aproximado de los constituyentes del concreto, en volumen y las funciones correspondientes.

Tabla 1. *Porcentaje aproximado de los constituyentes del concreto, en volumen y funciones.*

Componente		Composición (%) en volumen	Funciones
Pasta	Aire	4-8%	Se encarga de pegar los agregados para formar una piedra artificial.
	Cemento	7-15%	Cuando la mezcla está fresca, se encarga de lubricar, dar fluidez y permite que se pueda trabajar el material. Luego, es responsable del fraguado y su solidificación controlando la resistencia, la durabilidad y la permeabilidad del concreto.
	Agua	14-18%	
Agregados	Finos	25-30%	Sirven como relleno y reducir los costos de la mezcla, sirven para mitigar la aparición de agrietamientos en el fraguado, y junto con la pasta, contribuye con el desarrollo de resistencia del concreto con la edad.
	Gruesos	30-50%	

Fuente: (Matallana, 2023)

A continuación, se hará énfasis en la dosificación y diseño para el material principal de este proyecto de investigación que es el concreto poroso o permeable, para diseñar un hormigón permeable, es preciso crear una serie de relaciones entre materiales, que involucren cambios en la conducta mecánica del material, de igual manera en la forma que se valoran los modelos de calidad.

Los autores (Lian & Zhuge, 2010a) mencionan que el concreto poroso se compone normalmente de agregados de un solo tamaño, unidos mediante cemento Portland. Esto da lugar a la formación de vacíos conectados entre sí, lo que permite que el agua fluya a través del concreto a velocidades considerablemente altas. y como ya se ha expuesto antes, se utiliza de forma restringida como material de pavimento, debido a su resistencia estructural insuficiente.

Explica (Torres et al., 2015) que la cantidad usada de cemento tiene afectación en el grosor del revestimiento, lo que conlleva un efecto directo sobre la porosidad y otras características mecánicas del concreto. El rendimiento del hormigón permeable se determina por las características de la estructura de los huecos, como el tamaño del agregado grueso, el

volumen de los huecos, la distribución de los huecos y la cantidad de cemento utilizado. El tamaño de los huecos no está determinado únicamente por el tamaño del agregado grueso, sino por el tamaño del agregado, la gradación y el espesor de la pasta de cemento. Una mayor porosidad del material no garantiza una mayor permeabilidad, ya que la permeabilidad es una función de la superficie de los huecos, el tamaño de los huecos y su distribución. Este proyecto se centró en dosificar el agregado grueso, el contenido de cemento y el contenido de huecos para correlacionar el espesor de la pasta de cemento con las propiedades clave del hormigón permeable. Esto se completó mediante un diseño de mezcla de hormigón controlado, una técnica de preparación de laboratorio controlada y un análisis de la sección transversal del hormigón endurecido.

En su investigación (Korat et al., 2015) indaga acerca de la influencia del tipo y tamaño de agregado en las propiedades del hormigón permeable. Se prepararon cinco mezclas de hormigón diferentes, incluida una mezcla de hormigón denso estándar y cuatro mezclas de hormigón permeable con diversos tipos de agregados (dolomita o escoria de acero) y diferentes proporciones de fracciones de agregado de 4-8 mm a 8-16 mm (30:60 o 60:30). Los resultados sugieren que una mayor cantidad de fracciones de agregado pequeñas (4-8 mm) produjo mezclas de hormigón de mayor densidad y resistencia a la flexión. Sin embargo, la porosidad conectada como parámetro principal para estimar la eficiencia del hormigón permeable se vio afectada más por el tipo de agregado que por el tamaño.

Por otra parte (Nguyen et al., 2014) plantea una metodología alternativa para el diseño del concreto poroso, este podría consistir en distribuir de manera uniforme la pasta de cemento según el tamaño del agregado grueso. Esto se lograría calculando el volumen de la pasta de cemento necesario y dividiéndolo entre el área superficial total del agregado. A partir de este cálculo, se determinará el espesor adecuado de la capa de pasta que excede el volumen del

agregado, garantizando así una distribución óptima de la pasta en todo el hormigón. Las proporciones reales de la mezcla para el hormigón permeable dependen de la aplicación, las propiedades mecánicas requeridas y los materiales utilizados. Se debe desarrollar otro método analítico para facilitar a los productores de hormigón. Partiendo del supuesto de que la pasta de cemento solo cumple una función de recubrimiento, no llena el vacío entre los granos de grava; El volumen de pasta de cemento se divide por el área de superficie de los agregados para determinar el espesor del exceso de pasta. Se ha definido un factor de escala para distribuir uniformemente la pasta de cemento hacia el tamaño de la grava. Además, se propone una prueba de drenaje del aglutinante para determinar la relación crítica agua/cemento para evitar el flujo de pasta de cemento hacia las capas inferiores del hormigón bajo la acción de la vibración o la compactación. El hormigón permeable se ha formulado de acuerdo con este método para validarlo. El hormigón poroso obtenido presenta una permeabilidad suficiente (1 mm s^{-1}) para drenar el agua de lluvia y una buena resistencia mecánica ($R_c = 28,6 \text{ MPa}$) con respecto a las aplicaciones típicas de hormigón permeable, como estacionamientos, pasarelas y carreteras de poco tráfico. Además, la resistencia mecánica del hormigón permeable en esta investigación es superior a la informada generalmente por otros autores. Los resultados indican que el método de diseño de mezcla teórica es una teoría exitosa para optimizar la composición del hormigón permeable.

Existe otro elemento sobresaliente en el diseño del hormigón poroso que es la relación entre agua y cemento, varios investigadores han logrado puntos donde se equilibran estos dos factores para este tipo de concretos, esto generalmente resulta por determinar principalmente la resistencia a compresión y la porosidad.

Desde un punto de vista hidrológico (Grubeša et al., 2018), sugiere que el agregado ideal es aquel que tiene bordes afilados, lo que facilita el paso del agua a través del sistema de poros. Además, enfatiza que una mayor proporción de agregado grueso contribuirá a mejorar las propiedades hidráulicas y mecánicas del concreto permeable. De igual manera (Brake et al., 2016) indica que la resistencia a la flexión depende del tamaño y se puede predecir utilizando la ley del efecto del tamaño de Bazant utilizando un parámetro de resistencia a la tracción dependiente del peso unitario y una longitud de grieta característica con una precisión razonable. Sin embargo, no se encontró que la resistencia a la tracción y la energía de fractura inicial y total dependieran del tamaño.

Según lo proponen varios autores el rendimiento del concreto poroso puede mejorarse agregando una pequeña cantidad de arena fina, (Bonicelli et al., 2015) afirma que, a pesar de las amplias capacidades, las normas integrales aún son limitadas y muchos problemas aún no se han solucionado por completo. Por ejemplo, la compactación se subestima y uno de los esfuerzos más comunes se da con el apisonado manual; pero diferentes energías de compactación, técnicas o tiempos pueden afectar significativamente las propiedades mecánicas y funcionales del material. Además, el rendimiento se puede mejorar adicionando una cantidad mínima de arena, como sugieren muchos; la arena puede conducir a una mejor resistencia al desmoronamiento y al deslizamiento, optimizando de igual manera la resistencia máxima a la flexión. Por otro lado, demasiada arena y una energía de compactación inadecuada pueden dar lugar a un contenido de huecos excesivamente bajo y a características de drenabilidad reducidas.

Por otra parte, y para concluir (Xu et al., 2018) resalta en los resultados de investigación que el agregado fino es capaz de mejorar la resistencia y la durabilidad del hormigón permeable como material de base de carretera. El hormigón poroso, especialmente el modificado con agregado fino adicional, tiene ventajas sobre otros materiales de base de carretera en cuanto a la

erosión y contracción. El análisis de procesamiento de imágenes también demuestra que el agregado fino mejora el punto de unión entre los agregados en el hormigón poroso.

4. Marco teórico

En el caso del concreto poroso este se constituye básicamente de los mismos materiales que un concreto convencional, lo que varía son las distintas proporciones incluidas en los diseños de mezcla, cuyo propósito es alcanzar un equilibrio entre los vacíos, la resistencia, el contenido de pasta y la trabajabilidad.

El requisito más importante dentro del diseño de La mezcla consiste en suministrar la cantidad adecuada de pasta de cemento para unir los agregados, con el fin de alcanzar una alta resistencia y un buen contenido de vacíos. Si bien el método de volumen absoluto se aplica en el diseño de mezclas, el concreto permeable puede tener distintos requisitos de rendimiento, por lo que no hay un método de diseño de mezcla que sea universalmente aceptado o considerado estándar. A continuación, se presentan conceptos que son fundamentales en la teoría relacionada con la elaboración de concreto permeable.

4.1 Porosidad

La estructura porosa de este tipo de concretos se realiza omitiendo la mayor parte o la totalidad del agregado fino del hormigón normal y mediante un control cuidadoso de la fracción de pasta de cemento. Esto produce un material altamente poroso generalmente con un volumen de 15 a 35% de huecos interconectados que permiten una percolación de agua muy rápida, de igual manera, los tamaños de dichos poros pueden variar entre 2 a 8 mm según la proporción de la mezcla, el agregado utilizado y el grado de compactación (Kia et al., 2017).

Los concretos con porosidades menores al 15 % suelen filtrar el agua por la inexistencia de vacíos interconectados, por otra parte, las porosidades superiores al 35 % dan lugar a hormigones muy permeables, pero con una baja resistencia. (Meininger, 1988)

El concreto poroso también posee un contenido de finos poros capilares que son propiedades intrínsecas de la pasta de cemento, con tamaños característicos que van desde varios micrones hasta nanómetros. Como se mencionó anteriormente, el contenido de vacíos en el concreto permeable suele ser del 15 al 35%, dependiendo de diversas variables como la proporción de pasta de cemento, la cantidad de agregados, la gradación y la forma de las partículas, la relación agua/cemento y el esfuerzo de compactación. (ACI, 2010).

4.2 Infiltración

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua de las precipitaciones se filtra en el suelo. Una parte de esta agua es utilizada por los organismos y la naturaleza, mientras que otra se convierte en aguas subterráneas. Parte de esta agua puede emerger rápidamente, mientras que otra se une a las reservas subterráneas del planeta.

Este término se refiere al agua que no ha sido evaporada ni almacenada en cuerpos de agua como lagos, ríos o arroyos y que queda en el suelo, donde ingresa gracias a la capilaridad y la gravedad. La tasa de infiltración indica cuán rápido el agua penetra en el suelo durante un período determinado; si la precipitación se excede o es igual a cero, la capacidad de infiltración alcanza su punto máximo; de lo contrario, el suelo no ha alcanzado su plena capacidad.

La infiltración indica únicamente la cantidad de agua que pasa a través de la superficie. El flujo está insaturado y se dispersa lateralmente a través del pavimento. La principal diferencia entre permeabilidad e infiltración es que la permeabilidad se refiere al flujo saturado, mientras

que la infiltración se refiere al flujo insaturado (Kevern, 2015). La infiltración se mide siguiendo la norma ISO 17785-1:16. Se recomienda una tasa mínima de infiltración de 200 pulgadas por hora (1,41 mm/s) como criterio para su aceptación.

4.3 Absorción

La absorción en los agregados es el incremento en la masa del agregado debido al agua en los poros del material, pero sin incluir el agua adherida a la superficie exterior de las partículas, expresado como un porcentaje de la masa seca, la cantidad de absorción de agregado se puede determinar fácilmente debido al registro de diferencia de pesos, entre el peso saturado y superficialmente seco y el peso seco, expresado como un porcentaje de absorción (Guzmán, n.d.).

$$\%absorción = \frac{p_{sss} - p_s}{p_s} \times 100$$

Donde:

P_{sss}: Peso de la muestra saturada y superficialmente seca

P_s: Peso seco de la muestra.

4.4 Resistencia a compresión

Las mezclas de concreto permeable pueden alcanzar resistencias a la compresión que oscilan entre 500 psi y 4000 psi (3,5 MPa a 28 MPa), lo que las hace adecuadas para diversas aplicaciones. Los valores típicos son alrededor de 2500 psi (17 MPa). Al igual que con cualquier tipo de hormigón, las propiedades y combinaciones de materiales específicas, así como las técnicas de colocación y las condiciones ambientales, influirán en la resistencia real en el sitio (Paul et al., 2004).

Se requiere una resistencia de diseño de 13,8 MPa para aceras y senderos que no estén expuestos a vehículos (Crouch et al., 2006). Los pavimentos sometidos a tráfico demandan resistencias superiores a 20,7 MPa y generalmente están limitados a velocidades bajas y/o un uso poco frecuente (Angela Susan Hager, 2008). La resistencia del concreto permeable está determinada por su porosidad total.

Los estudios sobre la correlación entre las resistencias a la compresión y a la flexión han llevado a concluir que el ensayo de compresión es el método más adecuado para evaluar la calidad del concreto, ya que es un procedimiento más confiable y con menor incertidumbre (Argos, 2019).

4.5 Marco legal y normativo

Con respecto al marco normativo y legal en el cual se basa este proyecto de investigación, en primer lugar, se pueden identificar las normas y especificaciones técnicas emitidas por el INVIAS (2012), citadas a continuación:

INV E-213-13: Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos.

Este apartado habla del método de ensayo para determinar la distribución de los tamaños de los agregados gruesos y finos, es decir, la granulometría de un material, usando el método del tamizaje.

INV E-214-13: Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz No.200 en los agregados pétreos mediante lavado.

Este procedimiento está descrito para determinar la cantidad de material que pasa el tamiz No. 200, tales como limos, arcillas, polvos y otros agregados solubles en agua. Dicho

procedimiento incluye una operación de lavado para lograr la separación de los agregados antes de pasarlos por el tamiz.

INV E-218-13: Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½”) por medio de la máquina los ángeles.

Este método de ensayo se realiza para poder determinar la resistencia a la degradación de los agregados gruesos con tamaños inferiores de 37.5 mm (1 ½”) mediante el uso de la máquina los ángeles donde se aplican acciones de abrasión, impacto y molienda sobre el material determinado. La degradación se reporta como un porcentaje de pérdida de masa después de realizado el tamizaje.

INV E-222-13: Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino.

Dicho ensayo sirve para determinar la densidad, la densidad relativa y la absorción de agua del agregado fino. Los valores que se determinan son promedios calculados para la una cantidad de partículas de agregado, sin incluir los vacíos entre ellas también llamado como fracción sólida.

INV E-223-13: Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso.

Igual que el ítem anterior, este procedimiento sirve para determinar la densidad, la densidad relativa y la absorción de agua, pero en este caso para el agregado grueso. Los valores determinados son promedios calculados para la cantidad de partículas de agregado dada sin incluir los vacíos entre ellas, también llamados fracción sólida.

INV E-217-13: Densidad de bulk (peso unitario) y porcentaje de los agregados en estado suelto y compactado.

La densidad bulk también conocido como peso unitario es la masa de un volumen de agregado en bruto, este volumen incluye el volumen de las partículas individuales de agregado y

el volumen de los vacíos entre las partículas. Este se expresa en Kg/m³. También son utilizadas por muchos métodos de selección de proporciones para mezclas de concreto. La densidad Bulk puede también ser usada para determinar la relación entre masa/volumen para conversiones.

INV E-404-13: Asentamiento del concreto de cemento hidráulico. (SLUMP).

El ensayo pretende suministrar un procedimiento para determinar el nivel de asentamiento en los concretos hidráulicos, puede aplicarse tanto en obras como en laboratorio. Es una prueba utilizada, para asegurar que la muestra de concreto en sea trabajable, esta muestra deberá estar en un rango para el cual se realizó el diseño de mezcla del concreto.

INV E-410-13: Resistencia a la compresión de cilindro de concreto.

Dicho ensayo se utiliza para determinar el comportamiento de un material bajo cargas de aplastamiento aplicadas y comúnmente, se realiza aplicando presión de compresión a una muestra de prueba (generalmente de geometría cúbica o cilíndrica), se calcula a partir de la carga de ruptura dividida por el área de la sección que resiste a la carga y se reporta en unidades de libra-fuerza por pulgada cuadrada (psi) en unidades corrientes utilizadas en EE. UU. o (MPa) en unidades SI. Evalúan la seguridad, durabilidad e integridad de materiales y componentes.

Otras normas de referencia para este proyecto es la Resolución 472 de 2017 que regula el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible regula la gestión integral de materiales residuales en actividades de construcción y demolición. Asimismo, se cita la NTC 4018/2023 sobre la escoria de alto horno granulada y molida para uso en concretos y morteros, la NTC 550/2020 para la elaboración y curado de especímenes de concreto en obra y la NTC 1377/2021 sobre la elaboración y el curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio.

5. Metodología

En esta sección se describen todos los aspectos metodológicos considerados en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

5.1 Tipo de investigación

Para los fines de este trabajo, se optó por un enfoque de investigación aplicada. Este tipo de investigación se orienta hacia la resolución de problemas de la vida cotidiana, como en procesos productivos, logísticos o tecnológicos en diversas áreas sociales. Su objetivo principal suele ser mejorar, innovar y optimizar algún sistema, objeto, equipo, máquina, proceso o procedimiento, basado en la ciencia, la tecnología y el conocimiento ingenieril (Esteban, 2018).

La investigación aplicada se enfoca en utilizar conocimientos científicos y tecnológicos para resolver problemas prácticos que surgen en la vida diaria, ya sea en el ámbito industrial, productivo o tecnológico. A diferencia de la investigación teórica, cuyo objetivo es ampliar el entendimiento general de un tema, la investigación aplicada busca lograr dar nuevas soluciones que sean concretas y eficaces a necesidades específicas. Su finalidad es mejorar, optimizar o innovar en sistemas, procesos, o tecnologías ya existentes, aportando mejoras tangibles que benefician directamente a sectores como la industria o la ingeniería, contribuyendo así al desarrollo y progreso de la sociedad. (Vargas, 2009).

5.2 Materiales, equipos, procedimientos y ensayos de análisis

A continuación, se detallan los materiales, equipos e instrumentos utilizados, junto con los procedimientos y ensayos necesarios para analizar la caracterización de los agregados y las mezclas de concreto poroso, según los objetivos de la investigación.

5.3 Materiales

Los materiales principales para la preparación de las mezclas de concreto poroso experimentales son: la escoria de alto horno, los agregados pétreos, el cemento tipo Portland (marca Holcim) y agua.

5.4 Equipos e instrumentos

En lo que se refiere a equipos se requirieron:

- Molde cilíndrico (15x30cm)
- Pala
- Maceta
- Varilla lisa con punta redonda
- Tanque de agua
- Máquina de compresión
- Otros equipos y accesorios

5.5 Procedimientos y ensayos

La Tabla 1 presenta los procedimientos y pruebas que se llevaron a cabo para el análisis de los agregados de escoria y las mezclas de concreto, tanto convencionales como aquellas con

escoria. Cada una de las normas incluye una descripción detallada de los requisitos de materiales y equipos, las operaciones a ejecutar, los cálculos a realizar, y otras especificaciones o consideraciones que deben tenerse en cuenta al aplicarlos.

Tabla 2. Normas y especificaciones del INVIAS para concretos hidráulicos, ensayos y procedimientos.

Norma	Ensayo
INV E-213-13	Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos.
INV E-217-13	Densidad de Bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto
INV E-218-13	Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½”) por medio de la Máquina Los Ángeles.
INV E-222-13	Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino
INV E-223-13	Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso
INV E-238-13	Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato micro-Deval
INV E-404-13	Asentamiento del concreto de cemento hidráulico (SLUMP)
INV E-410-13	Resistencia a la compresión de cilindros en concreto.

Fuente. Elaboración propia.

La Tabla 2 presenta los procedimientos y ensayos que se llevaron a cabo para el análisis de los agregados de escoria y las mezclas de concreto poroso, tanto convencionales como aquellas con escoria. Cada una de las normas incluye una descripción detallada de los requisitos de materiales y equipos, las operaciones a ejecutar, los cálculos a realizar, y otras especificaciones o consideraciones que deben tenerse en cuenta al aplicarlos.

5.6 Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos

Este ensayo se realizó según la norma INV E-213-13, para ello se tomó una masa seca de muestra de agregados conocida, sometida a tamices de distintos tamaños para evaluar la distribución del material según el tamaño de sus partículas. En este caso, se realizó con la escoria de alto horno, grava, arena.

Figura 4. *Granulometría.*



a)



b)



c)

Fuente: Elaboración propia.

5.7 Densidad de bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto

Este ensayo se realizó conforme a la norma INV E-217-13, cuyo propósito principal es determinar el peso específico, de igual manera, calcular los vacíos presentes en los agregados de la mezcla. Para ello, se siguieron las especificaciones de la norma de ensayo. Se utilizó un recipiente de volumen conocido, que se llenó con el agregado (grava y escoria), compactándolo con varillas de apisonamiento para determinar su masa y obtener los resultados.

Figura 5. *Densidad de Bulk Suelto-Compacto.*



a)



b)



c)

Fuente. Elaboración propia.

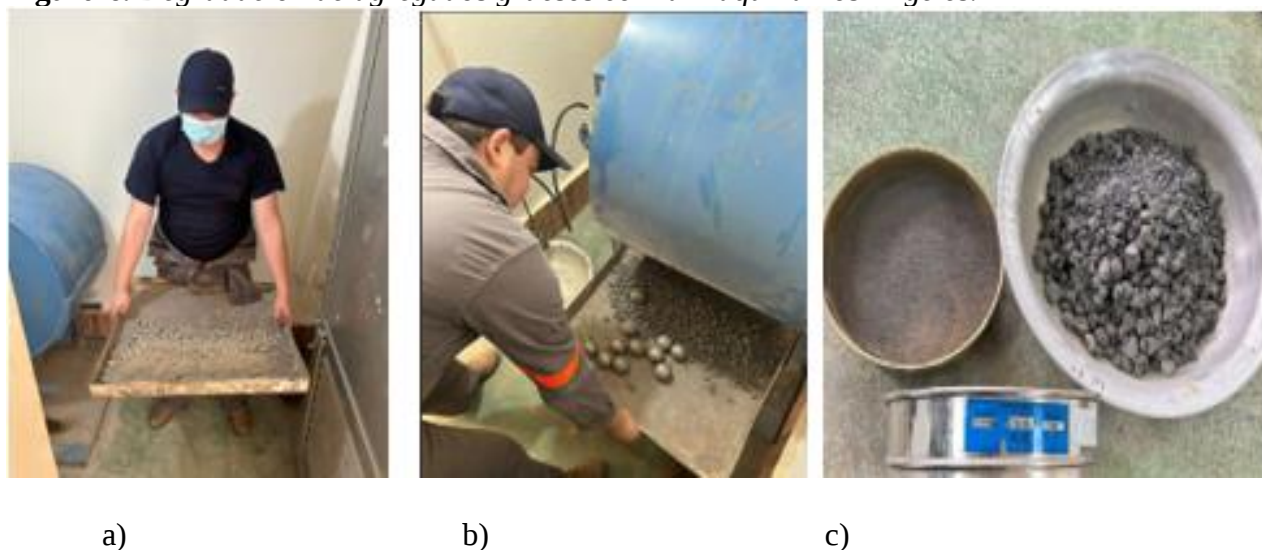
5.8 Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½") por medio de la máquina de los ángeles

De acuerdo con lo estipulado en la norma INV E-218-13, en primer lugar, se debe ubicar la muestra dentro del tambor en conjunto con la carga abrasiva (esferas metálicas), luego se dispone a programar la máquina de los ángeles para que el tambor gire a 30 rpm aproximadamente hasta complementar un ciclo de 500 revoluciones de ahí se procede a retinar el

material del tambor para continuar con la separación del material que sufrió desgaste por medio del tamiz #12 (1.17 mm) Este ensayo permite evaluar la degradación de los agregados con tamaños inferiores a 37.5 mm (1 ½'') frente a las acciones combinadas de abrasión, impacto y molienda, determinando la pérdida de masa en porcentaje.

De acuerdo con este procedimiento, el ensayo se llevó a cabo tanto para el triturado pétreo de ¾'' (Figura 6a) como para la escoria (Figura 6b), ambos utilizados como agregados gruesos en las mezclas de concreto, empleando 11 esferas debido a la granulometría tipo B de los materiales, conforme a lo establecido en la norma. Además, la Figura 9c muestra el resultado de la degradación en la muestra de escoria.

Figura 6. *Degradación de agregados gruesos con la Máquina Los Ángeles.*



Fuente. Elaboración propia.

5.9 Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino

Según la normativa INV E-222-13, primero se debe sumergir la muestra del agregado fino (arena) con un tiempo de espera de 24 horas aproximadamente, luego se drena el agua y que la muestra entre en estado seco superficialmente (figura 7 a) para poder determinar su masa. Después

se procede a hallar el volumen de la muestra de agregado fino utilizando la técnica de desplazamiento de agua en un recipiente graduado.

Finalmente, la muestra debe ser secada en un horno a aproximadamente 120°C durante 2 horas y se midió su masa seca. Con los datos obtenidos, se calcularon la densidad, la densidad relativa y la absorción de agua (ver Figura 7 b).

Figura 7. Muestra de arena sumergida en agua para la determinación de la densidad aparente y la absorción.



a)



b)

Fuente. Elaboración propia

5.10 Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso

Este ensayo se llevó a cabo siguiendo la norma INV E-223-13. Primero, se sumergió la muestra de agregado grueso durante aproximadamente 24 horas. Después de ese tiempo, se eliminó el agua y el material se secó superficialmente para medir su masa con los poros llenos. A continuación, se determinó el volumen de la muestra utilizando el método de desplazamiento de

agua en un recipiente. Finalmente, la muestra se secó en un horno a unos 110°C durante 3 horas, y se registró su masa seca. Con los datos obtenidos, se calcularon la densidad, la densidad relativa y la absorción de agua. Este procedimiento se realizó tanto para el triturado de ¾” como para la escoria negra (ver Figura 8).

Figura 8. Muestra de escoria sumergida en agua para la determinación de la densidad, la densidad aparente y la absorción.



Fuente. Elaboración propia.

5.11 Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato micro-deval

Según el procedimiento descrito en la norma INV E-238-13, se utilizó una muestra de agregado grueso con granulometría normalizada, sumergida en agua durante aproximadamente 1 hora. Posteriormente, la muestra se colocó en un recipiente de acero para realizar el ensayo, añadiendo 2 litros de agua y 5000 g de esferas de acero como carga de abrasión. El recipiente se hizo girar a una velocidad de 100 rpm durante 2 horas. Al finalizar, la muestra fue lavada y

secada. Este ensayo se llevó a cabo tanto con la escoria (ver Figura 9) como con el triturado de $\frac{3}{4}$ ". Las Figuras 16a y 16b muestran la extracción de las esferas metálicas, mientras que la Figura 16c muestra el pesaje inicial de la cantidad de esferas necesarias para el ensayo. La resistencia del agregado se determinó midiendo la pérdida de material a través de un tamiz No. 16, expresada como una proporción de la masa seca total de la muestra.

Figura 9. *Ensayo con micro-Deval para determinar la resistencia de la escoria*



a)

b)

c)

Fuente. Elaboración propia.

5.12 Asentamiento del concreto de cemento hidráulico (SLUMP)

De acuerdo con el procedimiento especificado en conformidad a la normativa INV E-404-13, Este ensayo busca dar un primer acercamiento a los ingenieros para evaluar la consistencia y trabajabilidad del concreto fresco, donde primeramente se procede a realizar la preparación del equipo y del concreto, estableciendo una superficie plana e impermeable en donde se va a colocar el molde para que inmediatamente se procede con el correspondiente llenado del molde de concreto mediante 3 capas las cuales se realiza su respectiva compactación

a cada una de estas (figura 10 a), finalmente se procede a retirar el molde cuidadosamente y se mide la diferencia entre la altura original del molde y la altura final del concreto como se observa a continuación (ver figura 10 b).

Figura 10. *Prueba de asentamiento del concreto (SLUMP).*



a)



b)

Fuente. Elaboración propia

5.13 Resistencia a la compresión de cilindros concreto

Este ensayo según la normativa INV E-410-13 consiste en someter a los cilindros de concretos moldeados a una carga axial de compresión a una velocidad controlada hasta que el espécimen falle, este mismo procedimiento se deberá realizar a los 7, 14 y 28 días del curado del concreto hasta obtener la totalidad de su resistencia.

Figura 11. *Elaboración de cilindros y ensayo de compresión.*



Fuente: Elaboración propia

5. Resultados

En este apartado se exhiben los resultados obtenidos a partir de los ensayos desarrollados con base en la adición de escoria de alto horno a las mezclas de hormigón permeable como reemplazo de la grava (agregado grueso) en diferentes proporciones y el impacto en sus propiedades en comparación con el concreto convencional. En general, se fabricaron un total de 18 cilindros para el ensayo de laboratorio de resistencia a compresión, los cuales fueron realizados en grupo de 3 muestras según el porcentaje de reemplazo con escoria puestas al curado de 7, 14 y 28 días, respectivamente.

Tabla 3. Seguimiento de las muestras y ensayos.

Tipo de concreto	Tipo de Cilindro	Fecha de elaboración	Fecha de ensayo	Días de curado
CONVENCIONAL	100% Escoria (E)	05/09/2024	13/09/2024	7
		05/09/2024	20/09/2024	14
		05/09/2024	04/10/2024	28
	100% Grava (G)	05/09/2024	13/09/2024	7
		05/09/2024	20/09/2024	14
		05/09/2024	04/10/2024	28
	50% E - 50% G	05/09/2024	13/09/2024	7
		05/09/2024	20/09/2024	14
		05/09/2024	04/10/2024	28
	10% Arena	05/09/2024	13/09/2024	7
		05/09/2024	20/09/2024	14
		05/09/2024	04/10/2024	28
POROSO	100% Escoria (E)	13/09/2024	20/09/2024	7
		13/09/2024	27/09/2024	14
		13/09/2024	04/10/2024	21
	100% Grava (G)	13/09/2024	20/09/2024	7
		13/09/2024	27/09/2024	14
		13/09/2024	04/10/2024	21

Fuente. Elaboración propia

5.14 Análisis granulométrico de los agregados grueso (Grava)

Tabla 4. Distribución por tamices de la muestra de grava.

GRANULOMETRÍA					
TAMIZ	Abertura	Masa retenida	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
#	mm	g	%	%	%
1"	25,400	0	0,00%	0,00%	100,00%
3/4"	19,100	381,5	19,10%	19,10%	80,90%
1/2"	12,700	1292,4	64,70%	83,80%	16,20%
3/8"	9,520	303,9	15,21%	99,01%	0,99%
Base	-	19,8	0,99%	100,00%	0,00%
TOTAL		1997,6			

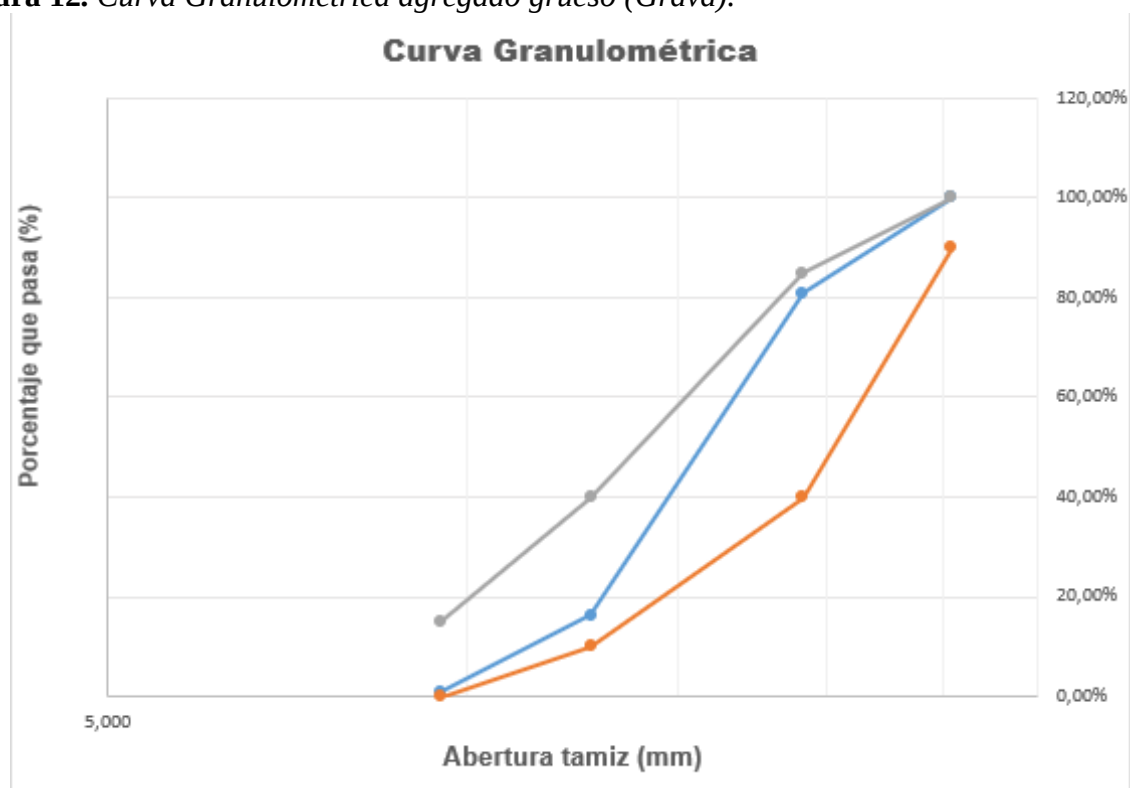
Fuente. Elaboración propia

Tabla 5. Límites granulométricos del agregado grueso (Grava).

CURVA GRANULOMÉTRICA			
TAMIZ	Abertura	Límite inferior	Límite superior
#	mm	%	%
1"	25,400	90%	100%
3/4"	19,100	40%	85%
1/2"	12,700	10%	40%
3/8"	9,520	0%	15%

Fuente. Especificaciones INVIAS 2022

El ensayo de granulometría mostró una distribución homogénea ya que los tamaños de partículas del agregado evaluado se encuentran bien equilibrados de manera uniforme dentro del rango de tamices utilizados para el ensayo. Donde, el 64,70% de las partículas pasaron a través del tamiz de 12.70 mm, lo que clasifica al material como un agregado grueso. La figura nos indica que la grava tiene una granulometría adecuada para usarse en mezclas de concreto, ya que los resultados cumplen con los parámetros establecidos por las Especificaciones Generales De Construcción De Carreteras 2022.

Figura 12. *Curva Granulométrica agregado grueso (Grava).*

Fuente. Elaboración propia

5.15 Análisis granulométrico de los agregados grueso (Escoria)

Tabla 6. *Distribución por tamices de la muestra de escoria.*

CURVA GRANULOMÉTRICA					
TAMIZ #	Abertura mm	Masa retenida g	% Retenido %	% Retenido acumulado %	% Pasa %
1"	25,400	0	0,00%	0,00%	100,00%
3/4"	19,100	385,1	19,27%	19,27%	80,73%
1/2"	12,700	1226,6	61,37%	80,64%	19,36%
3/8"	9,520	378,4	18,93%	99,57%	0,43%
Base	-	8,5	0,43%	100,00%	0,00%
TOTAL		1998,6	100,00%		

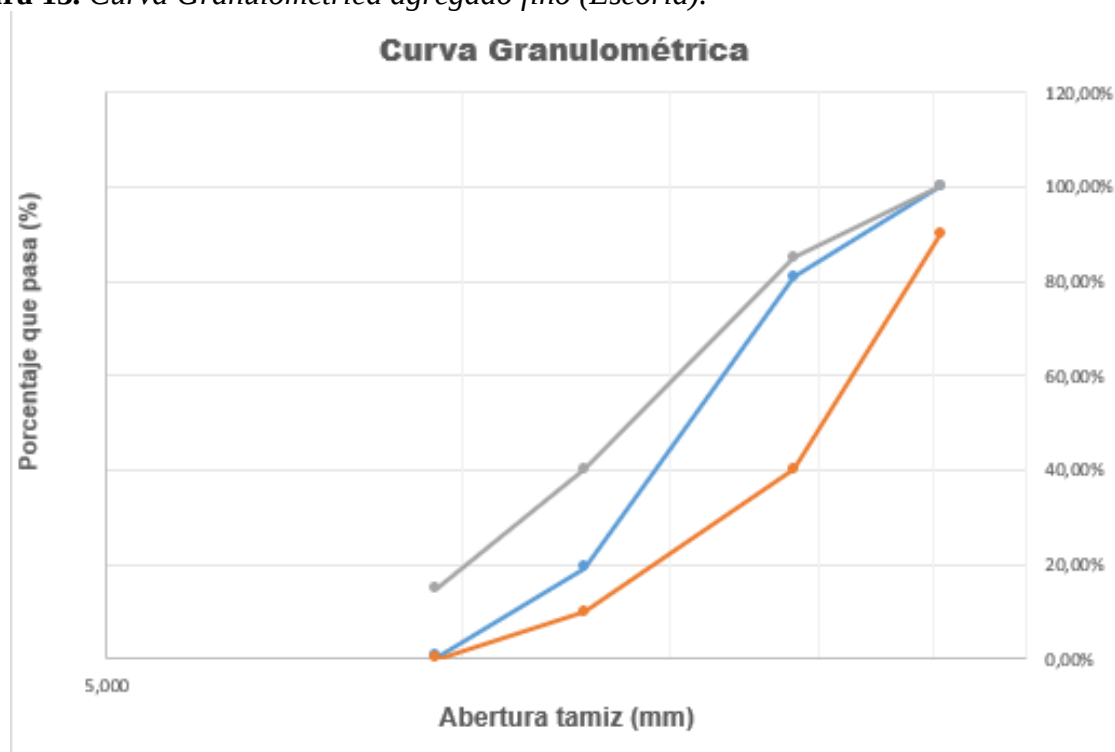
Fuente. Elaboración propia

Tabla 7. *Límites granulométricos del agregado grueso (Escoria).*

CURVA GRANULOMÉTRICA			
TAMIZ	Abertura	Límite inferior	Límite superior
#	mm	%	%
1"	25,400	90%	100%
3/4"	19,100	40%	85%
1/2"	12,700	10%	40%
3/8"	9,520	0%	15%

Fuente. Especificaciones INVIAS 2022

El ensayo de granulometría mostró una distribución homogénea ya que los tamaños de partículas del agregado evaluado se encuentran bien equilibrados de manera uniforme dentro del rango de tamices utilizados para el ensayo. Donde, el 61,37% de las partículas pasaron a través del tamiz de 12.70 mm, lo que clasifica al material como un agregado grueso. Del mismo modo la figura nos indica que la escoria cuenta con una granulometría adecuada para su uso en mezclas de concreto debido a que los resultados cumplen con los parámetros establecidos por las Especificaciones Generales De Construcción De Carreteras 2022.

Figura 13. Curva Granulométrica agregado fino (Escoria).

Fuente: Elaboración propia.

5.16 Análisis granulométrico del agregado fino (Arena)

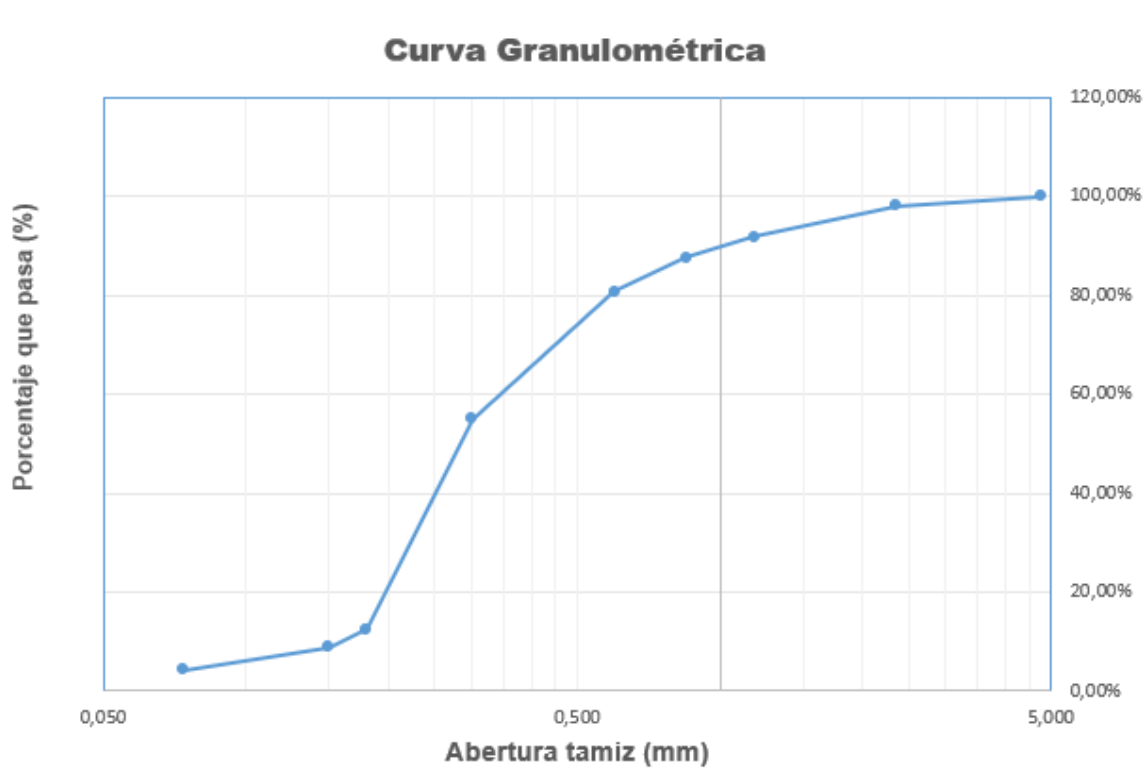
Tabla 8. Distribución por tamices de la muestra de arena.

CURVA GRANULOMÉTRICA					
TAMIZ #	Abertura mm	Masa retenida g	% Retenido %	% Retenido acumulado %	% Pasa %
4	4,750	0	0,00%	0,00%	100,00%
8	2,360	18,5	1,85%	1,85%	98,15%
16	1,180	64,3	6,44%	8,29%	91,71%
20	0,850	41,5	4,16%	12,45%	87,55%
30	0,600	67,7	6,78%	19,22%	80,78%
50	0,300	258,1	25,84%	45,07%	54,93%
80	0,180	423,7	42,43%	87,49%	12,51%
100	0,150	37,1	3,71%	91,21%	8,79%
200	0,074	45,6	4,57%	95,77%	4,23%
Base	-	42,2	4,23%	100,00%	0,00%
TOTAL		998,7			

Fuente. Elaboración propia

El ensayo de granulometría mostró una distribución homogénea ya que los tamaños de partículas del agregado evaluado se encuentran bien equilibrados de manera uniforme dentro del rango de tamices utilizados para el ensayo. Donde, el 42,43% de las partículas pasaron a través del tamiz de 0.180 mm, El módulo de finura fue de 1.656, lo que clasifica al material como un agregado fino. Así, la figura nos indica que la arena tiene una granulometría adecuada para usarse en mezclas de concreto, ya que los resultados cumplen con los parámetros establecidos por las Especificaciones Generales De Construcción De Carreteras 2022.

Figura 14. *Curva Granulométrica agregado grueso (Arena).*



Fuente: Elaboración propia

5.17 Densidad de bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados (grava y escoria) en estado suelto y compacto

Tabla 9. *Datos ensayo Bulk agregado grueso (grava).*

GRAVA		
DATOS		
Masa del agregado + recipiente. (G)	Masa del recipiente. (T)	Volumen del recipiente. (V)
6086,5	1284,2	2980,2
PESO UNITARIO COMPACTO		
	1,611	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. *Datos ensayo Bulk agregado grueso (escoria).*

ESCORIA		
DATOS		
Masa del agregado + recipiente. (G)	Masa del recipiente. (T)	Volumen del recipiente. (V)
6197	1284,2	2980,2
PESO UNITARIO COMPACTO		
	1,648	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. *Densidad de Bulk y vacíos de los agregados (grava y escoria).*

Densidad de BULK		
Material	Grava	Escoria
Valor (kg/m ³)	1611,402	1648,480
Vacíos en los agregados		
Material	Grava	Escoria
Gravedad específica (S) seca al horno	2,594	3,164
Densidad Bulk (M) (kg/m ³)	1611,402	1648,480
Densidad Agua (r _w) (kg/m ³)	998	
% Vacíos	37,76	47,79

Fuente: Elaboración propia

Tras realizar el ensayo de densidad de Bulk y poder calcular su porcentaje de vacíos de los agregados gruesos (grava y escoria) se pudo determinar que a partir de la relación entre la masa del agregado seco y el volumen del cilindro utilizado en el ensayo. El valor de la densidad Bulk para la grava fue de 1611,402 kg/m³ y para escoria fue de 1648,480 kg/m³, cuyo porcentaje de vacíos se calculó mediante la comparación entre la densidad de Bulk en conjunto con la densidad específica de los agregados, dando así, unos porcentajes de vacíos para la grava de 37,76% y para la escoria de 47,79%.

Estos resultados indican que los agregados presentan una densidad de Bulk adecuada para su uso en mezclas de concreto, de igual manera, su alto porcentaje de vacíos optimiza las propiedades de nuestro hormigón.

5.18 Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½’')

por medio de la máquina de los ángeles. (Escoria)

Tabla 12. *Granulometrías de las muestras de ensayo.*

TAMAÑOS DE TAMIZ		MASAS DE LAS DIFERENTES FRACCIONES			
PASA TAMIZ	RETENIDO EN TAMIZ	GRANULOMETRÍAS			
		A	B	C	D
37.5 (1 1/2")	25.0 (1")				
25.0 (1")	19.0 (3/4")				
19.0 (3/4")	12.5 (1/2")	1250 ± 25			
12.5 (1/2")	9.5 (3/8")	1250 ± 25			
9.5 (3/8")	6.3 (1/4")	1250 ± 10	2500 ± 10		
6.3 (1/4")	4.75 (No. 4)	1250 ± 10	2500 ± 10	2500 ± 10	
4.75 (No. 4)	2.36 (No. 8)			2500 ± 10	5000 ± 10
TOTAL		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Fuente: Normativa INVIAS Sección 200

Tabla 13. *Carga abrasiva según la granulometría.*

GRANULOMETRÍA	NUMERO DE ESFERAS	MASA DE LA CARGA
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Fuente: Normativa INVIAS Sección 200

Tabla 14. *Porcentaje de pérdidas escoria*

MÁQUINA DE LOS ÁNGELES ESCORIA (SECO)				
	PASA - RETIENE	PESO TASA (T)	MUESTRA (M)	TOTAL (T+M)
1	3/4 - 1/2	296,9	2500	2796,9
2	1/2 - 3/8	260,4	2500	2760,4
			Σ Masa (P1)	5000

PESO FINAL MICRODEVAL (P2)	4392,2	g
PORCENTAJE DE PÉRDIDAS	12,156	CUMPLE

Fuente: Elaboración Propia

Según los resultados de este ensayo se indica que la muestra de agregado grueso evaluado presentó una pérdida de masa de 12,156% valor que se encuentra dentro del límite máximo permitido por las especificaciones generales de construcción de carreteras para degradación por abrasión en el equipo Máquina de los ángeles, que es entre 8% y 40%. Dichos resultados nos indican que el material en cuestión posee una buena resistencia al desgaste, haciéndolo apropiado para aplicaciones en concretos porosos para bases de concreto hidráulico. La prueba de la Máquina de los ángeles nos permite analizar el comportamiento de los agregados en estado seco, a diferencia de otros ensayos.

5.19 Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½’’) por medio de la máquina de los ángeles. (Grava)

Tabla 15. *Porcentaje de pérdidas grava.*

MÁQUINA DE LOS ÁNGELES ESCORIA (SECO)				
	PASA - RETIENE	PESO TASA (T)	MUESTRA (M)	TOTAL (T+M)
1	3/4 - 1/2	258,1	2500	2758,1
2	1/2 - 3/8	259,4	2500	2759,4
			Σ Masa (P1)	5000

PESO FINAL MICRODEVAL (P2)	4091,4	G
PORCENTAJE DE PÉRDIDAS	18,172	CUMPLE

Fuente: Elaboración Propia

Según los resultados de este ensayo se indica que la muestra de agregado grueso evaluado presentó una pérdida de masa de 18,172% valor que se encuentra dentro del límite máximo permitido por las especificaciones generales de construcción de carreteras para degradación por abrasión en el equipo Máquina de los ángeles, que es entre 8% y 40%. Dichos resultados nos indican que el material en cuestión posee una buena resistencia al desgaste, haciéndolo apropiado para aplicaciones en concretos porosos para bases de concreto hidráulico. La prueba de la Máquina de los ángeles nos analizar el comportamiento de los agregados en estado seco, a diferencia de otros ensayos.

Tabla 16. Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino.

DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN I.N.V. E 223 - 13					
DATOS					
Peso del picnómetro	Peso del platón	Masa al aire de la muestra seca al horno	Masa del picnómetro aforado lleno de agua	Masa de la muestra saturada y superficialmente seca	Masa total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua
Pic G	Pl g	A g	B g	S g	C g
167,9	126,4	495,6	486,2	500,6	796

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 17. *Densidad relativa.*

CÁLCULOS		
DENSIDAD RELATIVA		
Densidad relativa (gravedad específica) seca al horno [SH]	2,597	kg/m ³
Densidad relativa (gravedad específica) en condición saturada y superficialmente seca [SSS]	2,624	kg/m ³

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 18. *Densidad relativa.*

DENSIDAD		
Densidad relativa (gravedad específica) seca al horno [SH]	2590,991	kg/m ³
Densidad relativa (gravedad específica) en condición saturada y superficialmente seca [SSS]	2617,131	kg/m ³

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 19. *Densidad aparente.*

DENSIDAD APARENTE		
Densidad aparente	2660,716	kg/m ³

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 20. *Absorción.*

ABSORCIÓN		
Absorción	1,009	%

Fuente: Elaboración Propia

Ensayo de determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato Micro-Deval.

Fórmula para ensayo de Micro-Deval

$$PORCENTAJE DE PÉRDIDAS = \frac{A - B}{A} \times 100$$

Para el caso de la GRAVA.

Si el tamaño nominal del agregado grueso es de 12.5 mm se deberá preparar una masa de 1500 ± 5 g con las siguientes especificaciones:

Tabla 21. Dosificaciones de agregado grueso.

pasa tamiz	retenido en tamiz	masa
19,0 mm	16 mm	375g
16 mm	12,5 mm	375g
12,5 mm	9,5 mm	750g

Fuente: sección 200, Norma INVIAS.

Tabla 22. Tamaño máximo del agregado y gradación utilizada Escoria.

MICRO-DEVAL ESCORIA (SECO)				
	PASA - RETIENE	PESO TASA (T)	MUESTRA (M)	TOTAL (T+M)
1	3/4 - 5/8	65	375	440
2	5/8 - 1/2	66,6	375	441,6
3	1/2 - 3/8	68	750	818
			Σ Masa (A)	1500

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23. Requisitos del agregado grueso para bases de concreto hidráulico.

Características	Norma de ensayo INV	Requisito
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	INV-E-238	30

Fuente: Especificaciones del INVIAS 2022.

PESO FINAL MICRODEVAL (B)	1256,7	g
--	--------	---

PORCENTAJE DE PÉRDIDAS	16,22	CUMPLE
-----------------------------------	-------	--------

Según los resultados de este ensayo, la muestra de agregado grueso evaluada presentó una pérdida de masa de 16,22% por debajo del límite máximo permitido por la norma INV-E-238 para degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, del 30%. Dichos resultados nos indican que el material en cuestión posee una buena resistencia al desgaste, haciéndolo apropiado para aplicaciones en concretos porosos para pavimentos de baja resistencia. El Micro-Deval, por la misma forma en que se realiza el ensayo, permite analizar el comportamiento de los agregados en estado húmedo, donde la presencia de agua reduce la resistencia.

Para el caso de la ESCORIA.

De igual manera que en el caso de la grava el tamaño nominal del agregado grueso es de 12.5 mm por lo tanto se deberá preparar una masa de 1500 ± 5 g con las siguientes especificaciones:

Tabla 24. *Dosificaciones de agregado grueso.*

pasa tamiz	retenido en tamiz	masa
19,0 mm	16 mm	375g
16 mm	12,5 mm	375g
12,5 mm	9,5 mm	750g

Fuente: sección 200, Norma INVIAS.

Tabla 25. *Tamaño máximo del agregado y gradación utilizada.*

MICRO-DEVAL ESCORIA (SECO)				
	PASA - PESO	MUESTRA	TOTAL	
	RETIENE	TASA (T)	(M)	(T+M)
1	3/4 - 5/8	66,5	375	442
2	5/8 - 1/2	63	375	438,5
3	1/2 - 3/8	50	750	800
		Σ Masa (A)	1501	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. *Requisitos del agregado grueso para bases de concreto hidráulico.*

Características	norma de ensayo INV	Requisito
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	INV-E-238	30

Fuente: Especificaciones del INVIAS 2022.

PESO FINAL MICRODEVAL (B)	1373,9	g
PORCENTAJE DE PÉRDIDAS	8,46	CUMPLE

Según los resultados del ensayo, pero, en este caso para el agregado de escoria, se indica que la muestra evaluada presentó una pérdida de masa de 8,46% valor que se encuentra por debajo del límite máximo permitido por la norma INV-E-238 para degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, que es del 30%, y también por debajo del agregado de grava. Los resultados nos indican que el material en cuestión tiene más resistencia a la degradación por abrasión y posee una buena resistencia al desgaste, haciéndolo apropiado para aplicaciones en concretos porosos para pavimentos de baja resistencia. El Micro-Deval, por la misma forma en

que se realiza el ensayo, permite analizar el comportamiento de los agregados en estado húmedo, donde la presencia de agua reduce la resistencia.

Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso.

Tabla 27. Datos de entrada para grava.

GRAVA			
DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN			
I.N.V. E 223 - 13			
AGREGADO GRUESO			
DATOS			
Peso del platón	Masa al aire de la muestra seca al horno	Masa al aire de la muestra saturada y superficialmente seca	Masa de la muestra saturada en agua
Pl	A	B	C
g	g	g	g
222,1	2915	2967	1843,2

Fuente: elaboración propia.

Tabla 28. Cálculos de densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción.

CÁLCULOS		
DENSIDAD RELATIVA		
Densidad relativa (gravedad específica) seca al horno [SH]	2,594	kg/m ³
Densidad relativa (gravedad específica) en condición saturada y superficialmente seca [SSS]	2,640	kg/m ³
DENSIDAD		
Densidad relativa (gravedad específica) seca al horno [SH]	2587,393	kg/m ³

Densidad relativa (gravedad específica) en condición saturada y superficialmente seca [SSS]	2633,549	kg/m ³
---	----------	-------------------

DENSIDAD APARENTE

Densidad aparente	2712,925	kg/m ³
-------------------	----------	-------------------

ABSORCIÓN

Absorción	1,784	%
-----------	-------	---

Fuente: elaboración propia.

Tabla 29. Datos de entrada para escoria.

ESCORIA			
DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN I.N.V. E 223 - 13			
AGREGADO GRUESO			
DATOS			
Peso del platón	Masa al aire de la muestra seca al horno	Masa al aire de la muestra saturada y superficialmente seca	Masa de la muestra saturada en agua
Pl	A	B	C
g	g	g	g
201,1	2867,3	2929,1	2022,8

Fuente: elaboración propia.

Tabla 30. Cálculos de densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción.

CÁLCULOS		
DENSIDAD RELATIVA		
Densidad relativa (gravedad específica) seca al horno [SH]	3,164	kg/m ³
Densidad relativa (gravedad específica) en condición saturada y superficialmente seca [SSS]	3,232	kg/m ³
DENSIDAD		
Densidad relativa (gravedad específica) seca al horno [SH]	3155,833	kg/m ³
	3223,852	kg/m ³

Densidad relativa (gravedad específica) en condición saturada y superficialmente seca [SSS]		
DENSIDAD APARENTE		
Densidad aparente	3386,775	kg/m ³
ABSORCIÓN		
Absorción	2,155	%
Fuente: elaboración propia.		

Tabla 31. *Valores promedios.*

VALORES PROMEDIOS		
DENSIDAD RELATIVA		
Densidad relativa (gravedad específica) seca al horno [SH]	2,851	kg/m ³
Densidad relativa (gravedad específica) en condición saturada y superficialmente seca [SSS]	2,906	kg/m ³
DENSIDAD		
Densidad relativa (gravedad específica) seca al horno [SH]	2843,482	kg/m ³
Densidad relativa (gravedad específica) en condición saturada y superficialmente seca [SSS]	2898,956	kg/m ³
DENSIDAD APARENTE		
Densidad aparente	3012,629	kg/m ³
ABSORCIÓN		
Absorción	1,970	%

Fuente: elaboración propia.

Después de realizar el ensayo de laboratorio y obtener los resultados correspondientes se analiza lo siguiente:

Para la muestra 1 que corresponde al agregado grueso tipo grava, la densidad relativa seca fue de 2.59 kg/m³ y la densidad aparente de 2712,9 kg/m³ mientras que el valor de absorción obtenido fue de 1.7%, lo que sugiere una capacidad media de absorción de agua. Realizando una comparación de estos resultados con los valores establecidos en la norma ASTM C127, se concluye que el agregado cumple con los requisitos para su uso en concreto estructural.

Dado el valor de absorción, se recomienda ajustar el contenido de agua en la mezcla para evitar una reducción en la trabajabilidad del concreto.

Por otro lado para la muestra 2 que corresponde al agregado grueso tipo escoria, la densidad relativa seca fue de 3,16 kg/m³ y la densidad aparente de 3386,7 kg/m³ mientras que el valor de absorción obtenido fue de 2,1%, lo que sugiere una capacidad media-alta de absorción de agua, esto debido en gran parte a la forma que posee el agregado de escoria, la cual contiene mayor número de poros que una grava convencional, lo que la hace más absorbente lo que facilita la fabricación de los concretos porosos.

Tabla 32. Asentamiento del concreto de cemento hidráulico (SLUMP).

Prueba de asentamiento del concreto (SLUMP) I.N.V. E - 404 - 13	
Tipo de concreto Descripción	Asentamiento mm
Concreto no poroso grava	155
Concreto no poroso 50-50	153
concreto no poroso escoria	30
Concreto poroso grava	20
Concreto poroso escoria	180
concreto poroso con 10% arena	50

Fuente: elaboración propia.

En general, los valores de asentamiento obtenidos muestran unas diferencias significativas asociadas a los distintos tipos de agregados y dosificaciones unos mostrando posible riesgo de segregación y otros que no. Consistencia y Trabajabilidad: Explica cómo el valor obtenido refleja la consistencia y trabajabilidad del concreto. Un mayor asentamiento indica una mezcla más fluida, mientras que un menor asentamiento sugiere una mezcla más seca y rígida.

Resistencia a la compresión de los cilindros de concreto.

Para este ensayo, primero se realizó un diseño de mezcla (ANEXO 1) donde se dio prioridad a una resistencia inicial de 21 Mpa o 3000 psi, valor competente para elaborar capas de rodadura o pavimentos utilizados en vías de tráfico livianos a medios. Desde los primeros ensayos de compresión con las fallas de los testigos que para este caso fueron 3 de solo grava, 3 de sola escoria, 3 con 50% grava y 50% escoria y 3 que contenían como agregado grueso solo escoria y un 10% de arena como agregado fino, se pudo evidenciar que el diseño de mezcla inicialmente planteado de manera efectiva se acercaba a la resistencia esperada; sin embargo y como era de esperarse, dichas muestras carecían de la idea principal de este proyecto de investigación, que son los concretos porosos o permeables.

Acto seguido se tomó otro diseño de mezcla el cual priorizaba la condición de porosidad y permeabilidad, en este caso se realizaron 3 testigos con sola grava y 3 testigos con sola escoria para evaluar también cuál de los dos agregados es más competente en la fabricación de concretos porosos, sin embargo y por el contrario del primer diseño de mezcla desde las fallas iniciales de los testigos, se evidencio que los valores del ensayo de compresión eran bastante bajos,

demostrando así que estas muestra carecían completamente de una resistencia competente, lo cual limita en gran medida el uso de dichos hormigones permeables.

A continuación, están los registros de cálculos de lo mencionado.

Fórmulas utilizadas en el ensayo de compresión:

- Promedio de diámetros

$$D_p = \frac{D_1 + D_2 + D_3}{3}$$

Donde

$$D_p = \text{Diámetro promedio, } m$$

$$D_1 = \text{Diámetro medición 1, } m$$

$$D_2 = \text{Diámetro medición 2, } m$$

$$D_3 = \text{Diámetro medición 3, } m$$

- Área sección transversal cilindros

$$A = \frac{\pi \times D_p^2}{4}$$

Donde

$$A = \text{Área de la sección transversal, } m^2$$

$$D_p = \text{Diámetro promedio, } m$$

- Resistencia máxima a la compresión

$$R = \frac{F}{A} \times \frac{1}{1000}$$

Donde

$$F = \text{Fuerza axial aplicada, } kN$$

$A = \text{Área de la sección transversal, m}^2$

$R = \text{Resistencia a la compresión, MPa}$

- Relación L/D

$$\text{Relación} = \frac{L}{D}$$

Donde

$L = \text{Longitud del espécimen, m}$

$D = \text{Diámetro del espécimen, m}$

Resultados con el primer diseño de mezcla:

Tabla 33. *Ensayo de compresión concreto no poroso con escoria, carga máxima.*

CONCRETO NO POROSO CON ESCORIA			
Día	Carga máxima	Diámetro espécimen	Área espécimen
Días	KN	m	m ²
7	327,409		
14	409,29	0,15	0,01767146
28	322,513		

Fuente: elaboración propia.

Tabla 34. *Ensayo de compresión concreto no poroso con grava, carga máxima.*

CONCRETO NO POROSO CON GRAVA			
Día	Carga máxima	Diámetro espécimen	Área espécimen
Días	KN	m	m ²
7	306,064		
14	403,433	0,15	0,0176715
28	491,174		

Fuente: elaboración propia.

Tabla 35. *Ensayo de compresión concreto no poroso (50% grava – 50% escoria), carga máxima.*

CONCRETO NO POROSO (50%GRAVA-50%ESCORIA)			
Día	Carga máxima	Diámetro espécimen	Área espécimen
Días	KN	m	m ²
7	244,053		
14	346,606	0,15	0,017671459
28	364,474		

Fuente: elaboración propia.

Tabla 36. *Ensayo de compresión concreto no poroso (10% arena), carga máxima.*

CONCRETO NO POROSO CON 10% DE ARENA			
Día	Carga máxima	Diámetro espécimen	Área espécimen
Días	KN	m	m ²
7	379,631		
14	481,759	0,15	0,017671459
28	577,566		

Fuente: elaboración propia.

Resultados con el segundo diseño de mezcla:

Tabla 37. *Resultados segundo diseño de mezcla ensayo de compresión concreto poroso-escoria, carga máxima.*

CONCRETO POROSO ESCORIA			
Día	Carga máxima	Diámetro espécimen	Área espécimen
Días	KN	m	m ²
7			
14	31,838	0,15	0,017671459
21	19,557		

Fuente: elaboración propia.

Tabla 38. Resultados segundo diseño de mezcla ensayo de compresión concreto poroso grava, carga máxima.

CONCRETO POROSO GRAVA			
Día	Carga máxima	Diámetro espécimen	Área espécimen
Días	KN	m	m ²
7	32,801		
14	27,707	0,15	0,017671459
21	43,609		

Fuente: elaboración propia.

Tabla 39. Resistencia máxima a la compresión por tipo de espécimen.

Resistencia máxima a la compresión			
Tipo de espécimen Descripción	Tiempo Días	Área m ²	Resistencia MPa
Concreto no poroso (Arena)	7		21,483
	14	0,0176715	27,262
	28		32,684
Concreto no poroso (Escoria)	7		18,528
	14	0,0176715	23,161
	28		18,251
Concreto no poroso (Grava)	7		17,320
	14	0,0176715	22,830
	28		27,795
Concreto no poroso (50-50)	7		13,811
	14	0,0176715	19,614
	28		20,625
Concreto poroso (Grava)	7		1,856
	14	0,0176715	1,568
	28		2,468
Concreto poroso (Escoria)	7		
	14	0,0176715	1,802
	28		1,107

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 40. *Relación Longitud/Diámetro.*

RELACIÓN L/D		
Diámetro	Longitud	L/D
m	m	-
0,15	0,3	2

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Basados en la investigación y en los aspectos prácticos que componen este proyecto, podemos concluir que el concreto poroso con agregado de escoria no es viable para vías, dado que los resultados de los ensayos de laboratorio desarrollados contemplando la norma INVIAS fueron concluyentes respecto a la baja resistencia que aportan los concretos permeables, debido en un primer aspecto a las características propias de estos materiales los cuales presentan un alto porcentaje de poros o vacíos lo que produce una disminución significativa de la resistencia con respecto a la de un concreto convencional, en segundo lugar, se pudo llegar a dicha conclusión sustentados en el ensayo de compresión, el cual arrojó que los testigos elaborados para concreto permeable soportaron una carga mucho menor que la de los testigos fabricados para material no permeable; sin embargo, sí podría aplicarse en el ámbito urbanístico para el control y mitigación de inundaciones.

El concreto poroso con agregado de escoria, podría ser utilizado en lugares como parqueaderos, ciclovías, sistemas de drenaje urbano, senderos peatonales, aceras, entre otros; siempre y cuando se realice un adecuado diseño de mezcla donde entre otras cosas se proponga el uso de aditivos para aumentar la resistencia de este.

Mediante los ensayos realizados con la máquina de los ángeles y micro deval, los resultados dan una clara evidencia que la escoria de alto horno tiene una mayor resistencia al desgaste por abrasión obteniendo como resultado los siguientes porcentajes, escoria (12.15% de pérdida) y el agregado de grava (18,17% de pérdida), luego, el ensayo de micro deval confirma los resultados

anteriores aunque los porcentajes de pérdida son menores en el ensayo debido a que la adición del agua genera un efecto de resistencia en los agregados, por lo tanto se puede concluir que el agregado de escoria es una gran alternativa que ayuda a la resistencia y durabilidad de los materiales que se aplican para la construcción de carreteras.

En cuanto a la comparación de los diseños de mezcla utilizados en el proyecto se puede concluir que, en primer lugar, entre más resistencia presente el material menos porosidad o permeabilidad va a ostentar; en segundo lugar, se infiere que otro factor causal en la reducción significativa de la capacidad permeable de un concreto es el agregado fino de arena.

Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos, se recomienda incluir algún aditivo en el diseño de la mezcla que aumente la resistencia de los concretos porosos, para lograr que mejore este material y volverlo más competente y funcional.

Se aconseja continuar con la investigación a nivel hidráulico y económico, también con respecto al uso de materiales alternativos de construcción, que dan beneficios ambientales y sociales.

Se recomienda que durante el proceso de compactación para realizar los ensayos de compresión y flexión se hagan menos punciones con la varilla, y que se deben dar menos golpes con el mazo, así se aumenta el porcentaje de vacíos y se mejora la permeabilidad.

Según la investigación previa, los agregados de tipo grava provengan de río y no de cantera, ya que la primera cuenta con mayor resistencia.

Referencias

- A. Rezi and M. Allam,. (1995). Techniques in array processing by means of transformations . En *Control and Dynamic Systems Vol. 69* (págs. 133-180). San Diego: Academic Press.
- AASHTO. (s.f.). AASHTO. Obtenido de Transportation: <https://transportation.org/>
- ACI. (s.f.). *American Concrete Institute*. Obtenido de <https://www.concrete.org/>
- American Concret Institute (ACI). (2010). Report on Pervious Concrete 522 (Issue March). In *ACI Commitee*. Obtenido de <https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/522R-10web.pdf>
- American Psychological Association. (s.f.). *Style and Grammar Guidelines*. Recuperado el 17 de enero de 2020, de Apastyle: <https://apastyle.apa.org/style-grammar-guidelines>
- Angelone, S., Garibay, M. T., & Cauhapé, M. (2006). *Permeabilidad de suelos* . Obtenido de Universidad Nacional del Rosario: <https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Permeabilidad%20en%20Suelos.pdf>
- Arango, S. (s.f.). *Concreto permeable: desarrollo urbano de bajo impacto*. Obtenido de <https://360enconcreto.com/blog/detalle/concreto-permeable-desarrollo-urbano-de-bajo-impacto/>
- Argos. (s.f.). *Concreto Permeable*. Obtenido de https://colombia.argos.co/fichas_tecnicas/ft-concreto-permeable.pdf
- Argos. (s.f.). *Concreto Relación Agua – Material Cementante*. Obtenido de <https://colombia.argos.co/concreto-relacion-agua-material-cementante/>
- Argos, C., & Arango, S. E. (2016). Concreto permeable (1 de 2). 3, 80–85. Obtenido de <https://colombia.argos.co/concreto-permeable/>
- ASTM International. (s.f.). *International Standards From ASTM*. Obtenido de <https://la.astm.org/>

- Bhutta, M. A., Tsuruta, K., & Mirza, J. (2012). Evaluation of high-performance porous concrete properties. *Construction and Building Materials*, 31, 67-73. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.024>
- Cámara Colombiana de la Construcción, CAMACOL. (2022). *Proyección sectorial: PIB edificador 2023*. Obtenido de Informe económico: https://camacol.co/sites/default/files/descargables/Informe%20Econ%C3%B3mico%2015_0.pdf
- Chandrappa, A. K., & Biligiri, K. P. (2016). Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects : A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 111, 262–274. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054>
- Chandrappa, A. K., & Biligiri, K. P. (2017). Flexural-fatigue characteristics of pervious concrete: Statistical distributions and model development. *Construction and Building Materials*, 153, 1-15. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.081>
- Ciclohidrologico.com. (s.f.). *Infiltración del agua*. Obtenido de https://www.ciclohidrologico.com/infiltracin_del_agua
- Comando Construcciones. (2024). *La industria siderúrgica colombiana desafíos y oportunidades*. Obtenido de <https://www.comandoconstrucciones.com/la-industria-siderurgica-colombianadesafios-y-oportunidades/>
- Coppola, L., Buoso, A., Coffetti, D., Kara, P., & Lorenzi, S. (2016). Electric arc furnace granulated slag for sustainable concrete. *Construction and Building Materials*, 123, 115-119. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.142>

CRAI USTA Bucaramanga. (2020). *Informe de recursos y servicios bibliográficos*.

Bucaramanga: Universidad Santo Tomás.

Deo, O., & Neithalath, N. (2011). Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4181-4189. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.055>

Desdeelmurete. (2022). *Capacidad portante y asentamiento. Generalidades*. Obtenido de <https://desdeelmurete.com/capacidad-portante-y-asentamiento-generalidades/>

Duque Escobar, G., & Escobar P., C. E. (2016). *Geomecánica. Capítulo II*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57121/relacionesgravimetricasyvolumetricasdelsuelo.pdf>

Flores, C., & Garamendi, D. (2022). Análisis comparativo de la resistencia a la compresión, flexión y trabajabilidad del concreto tradicional versus un concreto utilizando escoria de acero como agregado fino. *Gaceta Técnica*, 23(1), 20-34. Recuperado el 16 de 04 de 2024, de <https://www.redalyc.org/journal/5703/570369777003/html/>

Herogra Especiales. (2022). *La compactación del suelo: qué es, efectos y cómo prevenirla*. Obtenido de <https://herograespeciales.com/la-compactacion-del-suelo-que-es-efectos-y-como-prevenirla-2/>

HSA Henan Superior Abrasives. (s.f.). *Análisis de causas y medidas de desempolvado de superficies de hormigón*. Obtenido de <https://hsamaterial.com/es/Blog/cause-analysis-and-measures-of-concrete-surface-dusting.html>

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2023). *Boletín de Vigilancia Estratégica Sector Construcción*. Obtenido de E-vigía:
<https://www.icontec.org/wp-content/uploads/2023/03/BoletinConstruccion-2023.pdf>
- Instituto de Construcción y Gerencia. (1994). *La resistencia a la tracción del concreto*. Obtenido de <https://cdn-web.construccion.org/articulos/files/inf261-02.pdf>
- Instituto Mexicano del cemento y del concreto. (2007). *Resistencia a la abrasión*. Obtenido de <https://www.imcyc.com/revistact06/mar07/PROBLEMAS.pdf>
- Kayhanian, M., Li, H., Harvey, J. T., & Liang, X. (2019). Application of permeable pavements in highways for stormwater runoff management and pollution prevention: California research experiences. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 8(4), 358-372. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2019.01.001>
- Kim, Y. J., Gaddafi, A., & Yoshitake, I. (2016). Permeable concrete mixed with various admixtures. *Materials & Design*, 100, 110-119. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.109>
- Lopez, R., Pialarissi, S., Pujadas, P., & Aguado, A. (2017). Innovaciones y avances en el ambito de los pavimentos urbanos para smart cities. *Revista Técnica Cemento Hormigón*(982), 72-79. Obtenido de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/345228/PAVIMENTOS%20URBANOS_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Mayor, N., Valderrama, J. A., Rojas, M. A., Benavides, H. M., & Prado, D. (2020). *Uso de la Escoria de Horno de Arco Eléctrico (EHAE) como agregado fino para la producción de mortero estructural*. *EIEI ACOFI*. Obtenido de <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/830>

Miao, L. L. (November 8-12). A specification based approach to testing polymorphic attributes.

Formal Methods and Software Engineering: Proceedings of the 6th International Conference on Formal Engineering Methods, ICFEM 2004. Seattle, WA, USA,.

Nguyen, D. H., Sebaibi, N., Boutouil, M., Leleyter, L., & Baraud, F. (2014). A modified method for the design of pervious concrete mix. *Construction and Building Materials*.

Construcción y materiales de construcción, 73, 271-282. Obtenido de 73, 271–282.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.088>

Ondarse, Á. D. (2024). *Densidad*. Obtenido de Enciclopedia Concepto:

<https://concepto.de/densidad>

Osorio, J. D. (s.f.). *Resistencia mecánica del concreto y resistencia a la compresión*. Obtenido de

<https://360enconcreto.com/blog/detalle/resistencia-mecanica-del-concreto-y-compresion/>

Rahman, S., Northmore, A. B., Henderson, V., & Tighe, S. L. (2015). Developing A Framework for Low-Volume Road Implementation of Pervious Concrete Pavements. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 4(1), 77-91. Obtenido de

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2046043016300600?via%3Dihub>

Redacción 360 en Concreto. (s.f.). *¿Qué es el concreto?* Obtenido de

<https://360enconcreto.com/blog/detalle/que-es-el-concreto/>

Redacción 360 en concreto. (s.f.). *Protección y curado del concreto*. Obtenido de

<https://360enconcreto.com/blog/detalle/proteccion-y-curado-del-concreto/>

Redacción 360 en concreto. (s.f.). *Técnicas para el buen curado del concreto*. Obtenido de

<https://360enconcreto.com/blog/detalle/tecnicas-para-el-buen-curado-del-concreto/>

Restrepo, C. A., & Taborda, J. F. (2017). *El mercado colombiano del acero estructural en el contexto de la globalización*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.11912/8033>

- Rubi Blog. (2023). *Cemento Portland: ¿Qué es y cuáles son sus ventajas?* Obtenido de <https://www.rubi.com/es/blog/cemento-portland-que-es/>
- Saadeh, S., Ralla, A., Al-Zubi, Y., Wu, R., & Harvey, J. (2019). Application of fully permeable pavements as a sustainable approach for mitigation of stormwater runoff. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 8(4), 271-282. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2046043018301205>
- Sánchez, H. M. (2016). Escorias negras de horno de arco eléctrico y sus aplicaciones en pavimentos. *Revista L'esprit Ingéniux*, 63-72. Obtenido de <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieux/article/view/1367/1266>
- Silva, O. J. (s.f.). *Durabilidad del concreto: definiendo la frase*. Obtenido de <https://360enconcreto.com/blog/detalle/durabilidad-del-concreto-definiendo-la-frase/>
- Silva, O. J. (s.f.). *Tipos de agregados y su influencia en el diseño de mezcla del concreto*. Obtenido de <https://360enconcreto.com/blog/detalle/tipos-de-agregados-y-su-influencia-en-mezcla-de-concreto/>
- Sole, A. C. (2006). *Instrumentación Industrial*. Mexico: Alfaomega.
- Solis-Carcano, R. G., & Alcocer-Fraga, M. A. (2019). Durabilidad del concreto con agregados de alta absorción. *Scielo Ingeniería Investigación y Tecnología*, XX(4), 1-13. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v20n4/1405-7743-iit-20-04-00003.pdf>
- Solís-Carcano, R. G., & Chan-Magaña, G. E. (2020). *Desgaste por abrasión del concreto con agregado calizo de alta absorción*. Obtenido de Ciencia UANL: <https://cienciauanl.uanl.mx/?p=10249>
- Structuralia. (2022). *Todo sobre el análisis granulométrico y su curva*. Obtenido de <https://blog.structuralia.com/curva-y-analisis-granulometrico>

- Suárez, L. C. (2018). *Evaluación de escorias siderúrgicas de horno de arco eléctrico en mezclas de concreto estructural*. Obtenido de Tesis de maestría, Ingeniería Civil. Universidad de los Andes: <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/35e66b72-3ba9-4549->
- Sun, J. (2013). Strength criterion for ecological light porous concrete under multiaxial stress. *Construction and Building Materials*, 44, 663-670. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.062>
- Tamayo, P., Pacheco, J., T. C., de Brito, J., & Rico, J. (2020). Mechanical and Durability Properties of Concrete with Coarse Recycled Aggregate Produced with Electric Arc Furnace Slag Concrete. *Applied Sciences*, 10(216), 1-19. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/1/216>
- Tang, C. W., Cheng, C. K., & Tsai, C. Y. (2019). Mix Design and Mechanical Properties of High-Performance Pervious Concrete. *Materials*, 12(16). Obtenido de <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/16/2577>
- Torres, A. F., & Vega, D. A. (2022). *Evaluación de la escorrentía en el concreto permeable adicionado con sustitución*. Obtenido de Universidad Cooperativa de Colombia: <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/7424ef0d-c6f0-4c7a-ac6b-a20c3eea7542/content>
- Valdivielso, A. (s.f.). *¿Qué es la escorrentía?* Obtenido de iagua: <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-escorrentia>
- Vega, J. M. (2011). *Sistema urbanos de drenaje sostenible*. Obtenido de Alcaldía Mayor de Bogotá : <https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/anexo91.pdf>
- Wigner, E. P. (2005). Theory of traveling wave optical laser . *Phys. Rev.*, 134, A635-A646.

- Xie, N., Akin, M., & Shi, X. (2019). Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. *Journal of Cleaner Production*, 210, 1605-1621. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.134>
- Zhong, R., & Wille, K. (2015). Material design and characterization of high performance pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 51-60. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.027>
- Zhu, H., Yu, M., Zhu, J., Lu, H., & Cao, R. (2019). Simulation study on effect of permeable pavement on reducing flood risk of urban runoff. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 8(4), 373-382. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2018.12.001>