

ANÁLISIS DE RESISTENCIA MECÁNICA DE CONCRETO HIDRÁULICO
FABRICADO CON ESCORIA DE ARCO ELÉCTRICO PARA PAVIMENTO
RÍGIDO

JONATHAN ACEVEDO NIÑO

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TUNJA

2024

ANÁLISIS DE RESISTENCIA MECÁNICA DE CONCRETO HIDRÁULICO
FABRICADO CON ESCORIA DE ARCO ELÉCTRICO PARA PAVIMENTO
RÍGIDO

JONATHAN ACEVEDO NIÑO

PROYECTO PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR:

MILTON FERNANDO BALLESTEROS BARRETO

INGENIERO CIVIL

MÁSTER EN INGENIERÍA DEL TERRENO

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TUNJA

2024

Agradecimientos

Agradezco a Dios por la salud y sabiduría en este proceso. A mi madre y a mi padre por su cariño, amor y apoyo incondicional, a ellos por su sustento, enseñanzas, valores, principios y correctivos en el camino. A mis hermanos, por querer soñar de la mano conmigo y con sus enseñanzas lograr que las cosas se hagan posibles.

También agradezco a la Universidad, mi Alma Máter, quien me formo durante estos años. Al Ing. Milton Ballesteros por sus ardua experiencia y conocimientos en el área, fue un gran mentor y asesor.

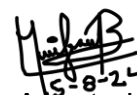
Y por último, a mis colegas y amigos por hacer inolvidable estos años de muchas experiencias vividas y mi más sincero agradecimiento a quienes de una u otra manera hicieron parte de este fin.

Dedicatoria

Este trabajo de investigación está dedicado principalmente a Dios por darme la vida. También a mis padres por el apoyo incondicional sin ellos esto no hubiera sido posible. A mis hermanos quienes me animaban cada día, con un "tú puedes", "ya falta poco"; esta felicidad que me embarga la comparto con gran satisfacción con ustedes las personas que han hecho esto posible.

Sin duda alguna este proyecto, ha sido una de las experiencias más satisfactorias de mi vida hasta ahora, por el aprendizaje y porque de alguna manera me ayudará a formarme en la vida, y por último este es el resultado del esfuerzo no solo mío sino de ustedes.

Nota de aceptación:



Libro Aceptado 5-8-24

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Tunja, 31 julio, 2024

Tabla de Contenido

1.	Introducción	13
2.	Descripción del Problema	16
3.	Objetivos.....	20
3.1.	Objetivo general	20
3.2.	Objetivos específicos	20
4.	Justificación.....	21
5.	Marco de Referencia.....	24
5.1.	Antecedentes.....	24
5.2.	Marco teórico y conceptual.....	32
5.2.1.	<i>El acero y su producción</i>	32
5.2.2.	<i>La industria del acero</i>	40
5.2.3.	<i>Escorias en la industria del acero</i>	45
5.2.4.	<i>Los concretos y sus componentes</i>	46
5.2.5.	<i>El concreto y sus propiedades</i>	56
5.2.6.	<i>Pavimentos rígidos</i>	64
5.3.	Marco normativo	70
6.	Metodología	75
6.1.	Tipo de investigación.....	75
6.2.	Materiales, equipos, procedimientos y ensayos de análisis.....	76
6.2.1.	<i>Materiales.....</i>	76
6.2.2.	<i>Equipos e instrumentos</i>	76
6.2.3.	<i>Procedimientos y ensayos</i>	77
6.3.	Fases de la investigación	89
6.3.1.	<i>Fase conceptual</i>	89
6.3.2.	<i>Fase de planeación y diseño</i>	90
6.3.3.	<i>Fase empírica</i>	92
6.3.4.	<i>Fase analítica</i>	93
7.	Resultados.....	95
7.1.	Caracterización de los agregados finos y gruesos	97
7.2.	Resistencia a la flexión del concreto	108

8.	Conclusiones y Recomendaciones	118
9.	Glosario.....	123
	Referencias Bibliográficas	126

Lista de Figuras

Figura 1.	Ruta semiintegrada para la producción de acero	34
Figura 2.	Representación de un HAE.....	36
Figura 3.	Diagrama de patrones energéticos en un HAE	40
Figura 4.	Producción histórica de acero crudo.....	42
Figura 5.	Precio de la tonelada de hierro jun 2014-feb 2022	44
Figura 6.	Curva para determinar el tiempo de fraguado según la NTC 890, ejemplo	62
Figura 7.	Granulometría de la arena.....	79
Figura 8.	Granulometría de la escoria negra	80
Figura 9.	Degradación de agregados gruesos con la Máquina Los Ángeles.....	81
Figura 10.	Muestra de arena sumergida en agua para la determinación de la densidad, la densidad aparente y la absorción	82
Figura 11.	Muestra de escoria negra sumergida en agua para la determinación de la densidad, la densidad aparente y la absorción.....	83
Figura 12.	Ensayo de producción de 10% de finos para el triturado $\frac{3}{4}$ ”	84
Figura 13.	Caras con y sin fracturas en el agregado grueso.....	85
Figura 14.	Determinación del índice de aplanamiento de una muestra de agregado, triturado	86
Figura 15.	Determinación del índice de alargamiento de una muestra de agregado, escoria	86
Figura 16.	Ensayo con micro-deval para determinar la resistencia de la escoria	87
Figura 17.	Determinación de la resistencia a la flexión en las viguetas de concreto	89
Figura 18.	Preparación de la mezcla de concreto convencional (0% escoria) y las viguetas para los ensayos	93
Figura 19.	Porcentaje de partículas que pasan en función del tamiz para los agregados....	98
Figura 20.	Granulometría de los agregados de las mezclas de concreto.....	99

Figura 21. Resistencia a la flexión en las muestras de concreto con edad de 7 días.....	109
Figura 22. Resistencia a la flexión en las muestras de concreto con edad de 14 días.....	111
Figura 23. Resistencia a la flexión en las muestras de concreto con edad de 28 días.....	113
Figura 24. Resistencia a la flexión en las muestras de concreto experimentales en función de la edad de curado	114

Lista de Tablas

Tabla 1.	Consideraciones sobre los HAE	38
Tabla 2.	Composición aproximada del concreto	47
Tabla 3.	Clasificación de los agregados.....	50
Tabla 4.	Componentes del cemento Portland	53
Tabla 5.	Factores que afectan la durabilidad del concreto.....	58
Tabla 6.	Clasificación de los concretos con respecto a la densidad o peso volumétrico.	60
Tabla 7.	Clasificación de los concretos a partir de su consistencia	61
Tabla 8.	Permeabilidad de los concretos según la NTC 4483	63
Tabla 9.	Posibles daños que pueden presentar los pavimentos rígidos	68
Tabla 10.	Normas y especificaciones del INVIAS para concretos hidráulicos, ensayos y procedimientos	78
Tabla 11.	Planeación de ensayos para los agregados.....	91
Tabla 12.	Diseño de mezclas y planificación de ensayos para cada muestra	92
Tabla 13.	Seguimiento de las muestras y los ensayos	95
Tabla 14.	Parámetros de diseño de las mezclas de concreto	96
Tabla 15.	Granulometría de los agregados para la mezcla	98
Tabla 16.	Comparación de la granulometría para agregados finos de la arena frente a la NTC 174:2018	100
Tabla 17.	Resultados de la masa unitaria, el peso específico nominal y la absorción de agua de los agregados	101
Tabla 18.	Índices de alargamiento y aplanamiento para el triturado $\frac{3}{4}$ por fracción.....	103
Tabla 19.	Índices de alargamiento y aplanamiento para la escoria negra por fracción ...	103
Tabla 20.	Índices globales de alargamiento y aplanamiento para la el triturado $\frac{3}{4}$ ” y la escoria negra	104

Tabla 21.	Resultados del ensayo con la Máquina Los Ángeles, triturado $\frac{3}{4}$ "	105
Tabla 22.	Resultados del ensayo con la Máquina Los Ángeles, escoria negra.....	105
Tabla 23.	Resultados del ensayo Micro-deval para el triturado $\frac{3}{4}$ "	107
Tabla 24.	Resultados del ensayo Micro-deval para la escoria negra	107
Tabla 25.	Resultados ensayo de resistencia mecánica de 10% de finos	108
Tabla 26.	Requisitos de agregado para pavimentos de concreto hidráulico (Tabla 500-4) 108	
Tabla 27.	Propiedades de las mezclas de concreto a los 7 días	109
Tabla 28.	Propiedades de las mezclas de concreto a los 14 días	111
Tabla 29.	Propiedades de las mezclas de concreto a los 28 días	113
Tabla 30.	Cuadro comparativo.....	117

Lista de Anexos

Anexo 1.	Análisis granulométrico del triturado $\frac{3}{4}$ ” ponderado	137
Anexo 2.	Análisis granulométrico de la escoria negra, ponderado	139
Anexo 3.	Análisis granulométrico de la arena, ponderado.....	141
Anexo 4.	Análisis granulométrico de la grava, ponderado	143
Anexo 5.	Diseño de mezcla	145
Anexo 6.	Determinación de masas unitarias para la grava.....	148
Anexo 7.	Peso específico y absorción de agregados gruesos, grava	149
Anexo 8.	Determinación de masas unitarias triturados	150
Anexo 9.	Peso específico y absorción de agregados gruesos y finos, triturado $\frac{3}{4}$	150
Anexo 10.	Determinación de masa unitaria para la escoria	152
Anexo 11.	Peso específico y absorción de agregados gruesos y finos escoria	154
Anexo 12.	Determinación de masa unitaria para la arena	155
Anexo 13.	Peso específico y absorción de agregados gruesos y finos arena	156
Anexo 14.	Caras fracturadas del triturado	158
Anexo 15.	Resistencia a la flexión para las muestras de concreto hidráulico con y sin escoria	160

1. Introducción

Tanto a nivel nacional como internacional, el acero es un recurso de gran importancia para la industria siderúrgica y para otros sectores económicos que son motores de crecimiento y desarrollo como la construcción e infraestructura, gracias a que sus características le otorga una ventaja competitiva frente a otros materiales, por ejemplo, su resistencia mecánica, (Restrepo y Taborda, 2017; CAMACOL, 2022). Desde esta perspectiva, las organizaciones que se dedican a estos rubros de negocio se enfrentan permanentemente a una serie de desafíos derivados de las dinámicas y las tendencias del mercado global como resulta ser la adopción de un compromiso hacia prácticas más sostenibles y su materialización estratégica, (ICONTEC, 2023, Comando Construcciones, 2024).

En el caso de Colombia, uno de los problemas que surgen en torno a la fabricación de acero se remiten al impacto ambiental que se genera a partir de los subproductos residuales como las escorias, las cuales se producen en cantidades que oscilan entre 180 y 230 kg de escoria por tonelada de acero, (Sánchez, 2018; Suárez, 2018). Bajo este panorama, el objetivo general de este trabajo es realizar un análisis comparativo entre el concreto convencional y el concreto modificado con escoria negra producida en los hornos de arco eléctrico (HAE) como agregado grueso, el cual corresponde con la problemática que se plantea entorno al aprovechamiento de este subproducto de acería y la pregunta de investigación que orienta la investigación.

En ese orden, se desarrolla el marco de referencia que sustenta la investigación a través de los antecedentes, el marco teórico-conceptual y el marco normativo aplicable; allí, se realiza una aproximación a las investigaciones que sirven como referentes sobre la

caracterización y análisis de las propiedades mecánicas de los concretos modificados con escorias de acería, además de aproximarse a la industria siderúrgica, la producción de acero en el país, los tipos de escorias generados en los procesos, y no menos importante, se hace una aproximación a los concretos y los pavimentos rígidos desde la perspectiva de su composición y sus características.

Metodológicamente, este trabajo constituye una investigación aplicada en el análisis comparativo en el comportamiento de las mezclas de concreto modificado frente al convencional el cual visibilizara posibles usos alternativos de la escoria de acería. Luego, a nivel experimental, se propuso la caracterización de los agregados gruesos y finos usados en las mezclas de concreto a partir de la normatividad INVIAS en materia de concretos hidráulicos para realizar ensayos tales como granulometría, determinación de finos 10%, resistencia al desgaste por medio de la Máquina Los Ángeles y del ensayo Micro-deval, o la determinación de los índices de aplanamiento y alargamiento de las partículas, entre otros, los cuales, se incorporan en este trabajo.

Asimismo, para dar cumplimiento al objetivo general de este estudio, el análisis comparativo del concreto convencional (0% escoria) frente al concreto modificado (mezclas con 5%, 25%, 50%, 70% de escoria) se desarrolla con base en los resultados obtenidos con relación a la resistencia del material, razón por la cual se incluyen ensayos para la determinación de la resistencia a la flexión mediante una viga simple apoyada y cargada en los tercios de la luz libre y su variación en función del tiempo de curado considerando periodos de 7, 14 y 28 días.

De acuerdo con los resultados, es posible proponer el uso de la escoria negra como un agregado grueso con potencial para ser usado como alternativa sostenible y amigable con el medio ambiente en la manufactura de concretos hidráulicos para pavimentos rígidos; se trata de un material con características favorables que cumplen los requerimientos normativos para garantizar una buena resistencia y durabilidad. En particular, se destaca que la mezcla de concreto modificado con un 75% de escoria negra fue la que presentó mejor desempeño en términos de la resistencia a la flexión y módulo de rotura, a su vez que un mayor tiempo de curado incrementa la magnitud de estas propiedades.

La importancia de la mitigación del impacto ambiental se manifiesta claramente en el aprovechamiento de la escoria negra generada por el horno de arco eléctrico, un subproducto que puede ser transformado en una valiosa materia prima. Este enfoque no solo contribuye a la generación de empleo a través del uso de trituradoras de cono y maquinaria amarilla, sino que también ayuda a reducir las emisiones de CO₂ asociadas con el transporte y la extracción de agregados naturales. Conocer las propiedades físicas y mecánicas de la escoria como reemplazo de agregados pétreos es fundamental, ya que permite disminuir los costos administrativos relacionados con la obtención de licencias ambientales y fletes, así como evitar la compra de terrenos para la gestión de rellenos. La viabilidad del proyecto se respalda por la existencia de trituradoras en las plantas de producción de acero en la región. Los resultados obtenidos en ensayos han demostrado que el uso de escoria es positivo y tiene un gran potencial para su aplicación en concretos, lo que abre nuevas oportunidades para una construcción más sostenible y eficiente.

2. Descripción del Problema

El acero es un recurso ampliamente usado en el sector de las construcciones y constituye una materia prima esencial para el desarrollo de infraestructura debido a que sus características son una ventaja competitiva frente a otros materiales estructurales en proyectos de ingeniería, (Restrepo y Taborda, 2017). En el ámbito nacional, la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia - ANDI (2021) explica que la industria siderúrgica nacional del acero se concentra en cinco (5) siderúrgicas completamente (Acerías Paz del Río, Gerdau-Diaco, GSR, Sidoc y Ternium), cuenta con capacidad instalada para 2.2 millones de toneladas anuales y su producción se destina mayoritariamente al sector construcción.

Ahora bien, teniendo en cuenta que el sector de las construcciones es uno de los motores de crecimiento económico y de desarrollo para Colombia, (CAMACOL, 2022), las organizaciones que pertenecen a la industria siderúrgica y de construcciones como tal, se enfrentan a una serie de desafíos derivados de las dinámicas y las tendencias del mercado global como resulta ser la adopción de un compromiso hacia prácticas más sostenibles y su materialización a través de estrategias, por ejemplo, para reducir las emisiones y residuos sólidos, reciclar materiales, y disminuir el consumo de agua y electricidad, entre otros, (ICONTEC, 2023, Comando Construcciones, 2024). Sin embargo, estos mismos desafíos representan oportunidades para avanzar en temas de sostenibilidad, adaptabilidad, competitividad y eficiencia.

En cifras recientes, el Comité Colombiano de Productores de Acero, reportó una producción de acero para concreto aproximada de 1.189 millones de toneladas para el año 2022 y de 1.168 millones de toneladas en 2023 marcando una tendencia decreciente en el

país, (ANDI, 2024). La comparación de las cifras de producción acumulada entre los meses de enero-noviembre del 2023 frente al 2022, dejan en evidencia una variación negativa de 7.7% para el acero crudo y del 4.5% para el acero laminado, con 53.7 y 48.5 millones de toneladas de acero, respectivamente, (ALACERO, 2024). Asimismo, en cuanto a la balanza comercial, se observa una variación positiva de 13.6% en las importaciones y de 4.9% en el consumo de acero durante el año 2023 frente al año 2022 en el mismo periodo de acumulación, pero la variación de las exportaciones es negativa con un porcentaje de 27.9%, (ALACERO, 2024).

En el contexto internacional, se señala que la industria siderúrgica colombiana se vio afectada en el año 2023 debido a la crisis inmobiliaria de China, el gigante de la producción de acero mundial, la guerra de Ucrania y el incremento de las importaciones con precios desleales que han puesto en desventaja la industria local, (Castellanos, 2024). Ahora bien, a nivel nacional, la desaceleración económica en 2023 debido a altas tasas de interés y la inflación también han repercutido negativamente sobre la industria siderúrgica a través de la demanda y los precios de los insumos, (Becerra, 2024).

Lo anterior, se relaciona con el hecho de que el consumo de acero disminuyó en un 8% por una caída en las ventas de viviendas de interés social y existe un mercado con comportamiento deficitario que se espera, durante el año 2024 se recupere alcanzando entre 3,6 y 3,7 millones de toneladas de acero en el consumo nacional, (Becerra, 2024). Cabe señalar que el mercado deficitario implica una dependencia de las importaciones y dado el panorama internacional, se pone en jaque la industria siderúrgica en el país.

De lo anterior, se cita lo dicho por algunos autores, quienes se refieren a la cantidad de escoria que se produce en la industria del acero, a saber: Novoa (2020) señala que se generan aproximadamente 145 kg de escoria y 230 kg de escoria granulada de alto horno por tonelada de acero; Sánchez (2018) indica que se generan 0.1 a 0.3 toneladas de escorias por tonelada de acero; y ALACERO estima que se generan aproximadamente 180 kg de escoria por tonelada de acero producida con hornos de arco eléctrico, (citado por Suárez, 2018).

La fabricación del acero, independientemente del proceso empleado, implica la obtención de subproductos como la escoria cuya composición general suele ser una mezcla de óxidos que se han formado en las altas temperaturas; aun así, es importante señalar que existen diferentes tipos de escorias que dependen de la ruta de producción, y por tanto, difieren en sus características y naturaleza determinando las posibilidades de su reutilización en otras industrias, (Suárez, 2018). En ese orden, si bien, en Colombia se produce acero a partir de la explotación de hierro obteniendo escoria de alto horno, la cual ha sido aceptada como agregado de los concretos, no ocurre lo mismo con las escorias que provienen de la fundición de chatarra en hornos de arco eléctrico (EAF) -el proceso más empleado en el país, pues carecen de investigación evidenciando un vacío de conocimiento, (Suárez, 2018; ANDI, 2021).

Así pues, desde una perspectiva de ambiente y sostenibilidad, se requiere maximizar la reutilización de los subproductos siderúrgicos y mejorar la eficiencia industrial. Luego, a la problemática de los residuos se le suma la sobreexplotación de recursos no renovables que son extraídos para suplir la demanda de materia prima para la elaboración de mezclas asfálticas y su respectiva huella de carbono. Todo esto, en conjunto, tiene un impacto negativo en el entorno. Al respecto, Camarena y Díaz (2021) explican que la industria de

pavimentos se encuentra orientando sus esfuerzos hacia la reducción de costos y el consumo de materia prima, al mejoramiento de la calidad de los concretos y a la protección del medio ambiente, razón por la que es necesario explorar alternativas innovadoras pero económicas como resultan ser los residuos industriales y agrícolas.

De lo poco que se sabe, se sugiere que las EAF pueden ser un material alternativo con potencial para sustituir parcialmente los agregados granulares convencionales que se usan en la producción de concretos, por ejemplo, debido al contenido de ciertos óxidos que actúan como auto cementantes (SiO_2 y Al_2O_3) o al contenido de cuarzo que aumenta su resistencia mecánica. En consecuencia, el problema focaliza su atención en la necesidad de profundizar en el conocimiento de sus propiedades, al igual que comprender en detalle los efectos de su adición en las propiedades mecánicas del concreto hidráulico, generando así una contribución al país y sus industrias.

Se plantea como pregunta de investigación:

¿Cómo son las propiedades mecánicas del concreto modificado con EAF frente a las propiedades del concreto hidráulico convencional?

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Realizar un análisis comparativo entre el concreto hidráulico convencional y el concreto modificado con EAF.

3.2. Objetivos específicos

- Describir las propiedades físicas relevantes en la mezcla de concreto como el porcentaje de aire, índice de alargamiento, índice de aplanamiento y módulo de finura.
- Comparar el módulo resiliente del concreto hidráulico convencional y el concreto modificado con escoria negra de arco eléctrico, a través de ensayos de laboratorio conforme a las normativas establecidas.
- Analizar el comportamiento de la mezcla de concreto hidráulico remplazado con diferentes porcentajes (5%, 25%, 50%, 70%) de EAF, en términos de resistencia a la flexión, para determinar el impacto de la variación en la adición de EAF en las propiedades mecánicas.

4. Justificación

Tanto el sector de las construcciones, como las industrias siderúrgicas y de pavimentos representan grandes pilares para la economía y el desarrollo del país; generan más de 45 mil empleos, movilizan más de 420 mil millones de pesos anuales en impuestos, además, benefician a más de 15 mil personas con sus programas de Responsabilidad Social Empresarial (RSE), (ANDI, 2022). En ese mismo sentido, con la crisis y la incertidumbre derivadas de la pandemia por COVID-19, demostraron ser industrias fuertes con altos niveles de producción y con capacidad para recuperarse ante contracciones moderadas de la economía gracias a que existe cierta colaboración en el mercado interno y la dependencia de las importaciones es menor, (ANDI, 2021; Comando Construcciones, 2024).

No obstante, se trata de industrias cuyos retos y desafíos se han agudizado debido a las exigencias de los mercados globales, los escenarios fluctuantes e imprevisibles, al igual que la crisis generalizada que caracteriza a la humanidad en la actualidad. Las organizaciones que pertenecen a estos sectores productivos se han visto empujadas hacia un proceso de transformación donde resulta fundamental replantearse sus prácticas e incorporar nuevas estrategias que les permitan adaptarse al contexto y responder a las necesidades imperantes del planeta y la humanidad sin poner en riesgo su supervivencia; siempre mirando al futuro, (ICONTEC, 2023).

Ciertamente, uno de los grandes retos y oportunidades para Colombia es la sostenibilidad en todas sus dimensiones. Por una parte, los problemas medioambientales asociados al crecimiento de la población, a los hábitos de consumo y, a los modelos económicos y de producción actuales, exigen que las organizaciones y la sociedad en general

tomen conciencia y adquieran responsabilidades para mitigar los impactos negativos de sus actividades sobre los recursos naturales, los ecosistemas, la biodiversidad y el clima. De aquí, que una de las mega tendencias imperantes sea la reducción de residuos sólidos; el reciclaje y la reutilización de residuos o chatarra en los procesos industriales son una forma de hacer más eficientes sus operaciones de manufactura, (ICONTEC, 2023). De otro modo, se encuentran otros objetivos tales como la optimización de recursos económicos, el tiempo y los insumos, la búsqueda de una mejora en la calidad de los productos, y la innovación expresada en prácticas más sostenibles, (Camarena y Díaz, 2021).

Hasta el momento, y para efectos de esta investigación, se reconoce que la industria de los aceros ha adoptado una producción a partir del reciclaje de las chatarras ferrosas mayoritariamente apuntándole a la sostenibilidad, a su vez que se esfuerza por reducir sus emisiones y la generación de residuos sólidos (escorias e impurezas) desaprovechables. En esa misma línea, la industria de los pavimentos se ha optado por concentrar esfuerzos en la investigación y desarrollo de nuevas mezclas para concretos usando agregados y aditivos alternativos basados en residuos de otras industrias para cumplir con sus objetivos de sostenibilidad como se ha descrito previamente. Cabe connotar que ambas industrias están ligadas al sector de las construcciones por lo que sus innovaciones y prácticas sostenibles se extienden hasta ésta.

Consecuentemente, la exploración y el análisis de las propiedades mecánicas en las mezclas de concretos donde se usa escorias obtenidas a partir de la fundición de chatarra con el horno de arco eléctrico, constituye no solo un avance para el conocimiento considerando que no se ha profundizado en el tema a pesar del potencial que tiene este material, sino que representa una contribución para las industrias siderúrgica, de pavimentos y el sector de las

construcciones en Colombia, en tanto propende por el desarrollo de una práctica innovadora de sostenibilidad con relación al diseño de mezclas de concreto.

En países desarrollados como Estados Unidos, Suiza, y Alemania ya se implementó el uso de las escorias de acero para la construcción de carreteras reemplazando el agregado natural que suele usarse convencionalmente, (Nguyen et al., 2018). Así pues, su implementación en un país emergente como Colombia puede ser un gran logro con impacto directo e indirecto en la economía nacional, la competitividad industrial en los mercados globales, el desarrollo productivo y social, y por supuesto, en el avance con los compromisos que se orientan a la protección y el cuidado del medio ambiente, (Flores y Garamendi, 2021).

Se debe tener presente que la investigación se rige por la normatividad vigente aplicable, a su vez que fomenta su total cumplimiento para garantizar la posible aplicabilidad de la innovación en actividades de construcción de manera estandarizada en el futuro.

5. Marco de Referencia

5.1. Antecedentes

A nivel internacional se encuentran diferentes referentes de investigación donde se ha estudiado el uso de la escoria que se produce en los hornos de arco eléctrico en la industria del acero como agregado en la fabricación de concreto a través de la evaluación y análisis de sus propiedades. Así pues, en seguida se relacionan algunos de ellos, cuyos resultados se han publicado en años recientes.

Coppola et al. (2016) analizaron la reología y las propiedades mecánicas en los estados fresco y endurecido para diversas mezclas de concreto fabricadas con escoria de horno de arco eléctrico como agregado granular en remplazo 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) que conjuntamente se sustituyeron en porcentajes de 10%, 15%, 20% y 25% en masa sobre el total de agregados en los concretos.

Según se informa, los ensayos que se realizaron en dicho trabajo incluyeron un análisis de tamiz, (UNI EN 933-1), un análisis de composición química de los agregados residuales o escoria, la evaluación de la absorción de agua y densidad de los agregados naturales y la escoria, (UNI EN 1097-6), un análisis petrográfico de todos los agregados (UNI EN 932-3), la prueba de azul de metileno para determinar la presencia de arcillas y lodos (UNI EN 933-9) y la prueba de Los Ángeles (UNI EN 1097-2). Luego, se fabricaron mezclas de concreto fijando un volumen determinado de agregados y variando la proporción de

reemplazo por escoria hasta llegar al 25% en masa; se midió el flujo del concreto en el momento de la preparación, y después de 30 y 60 minutos (UNI EN 12350-2), se determinó la cantidad de aire atrapado y la densidad del concreto fresco (UNI EN 12350-6, UNI EN 12350-7), además de la densidad, la resistencia a la compresión (después de 1,2,3,7 y 28 días), la resistencia a la flexión, la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad de la mezcla de concreto endurecida (desde los 28 hasta los 90 días).

En cuanto a los resultados más relevantes de su investigación, Coppola et al. (2016) reportaron 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. Asimismo, 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, y la pérdida de masa del material de 17% (LA20) y 26% (LA30) cuando se usó un tamiz de control 1.6 mm.

Ahora, en la caracterización que se realizó sobre las mezclas de concretos, los autores reportaron que en estado fresco 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. En ese mismo sentido, se reportó 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 superplastificante (y de aire atrapado como efecto secundario, >2%).

Por otra parte, en el concreto endurecido se observó 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 superplastificante 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. En consecuencia, los autores recomiendan usar un porcentaje máximo del 15% de escoria como reemplazo de agregados naturales para acceder a sus beneficios y evitar cargas muertas, vulnerabilidad estructural y sensibilidad a fisuras con respecto a los concretos convencionales.

Lam et al. (2017) por su parte, se enfocaron en la evaluación de las propiedades de mezclas de concretos mixtos usando escoria de horno de arco eléctrico como agregado grueso y cenizas volantes como agente cementante en pavimentos compactados con rodillo. En su diseño metodológico, los autores usaron escoria del sur de Vietnam para sustituir los agregados en un 0%, 50% y 100%, mientras que las cenizas volantes se reemplazaron en porcentajes de 0%, 20% y 40%. Se realizaron análisis sobre los agregados de escoria para determinar sus propiedades físicas y su composición química, incluyendo una prueba para evaluar el potencial de expansión según los estándares ASTM. Igualmente, se prepararon 9 mezclas de concreto y se realizó la prueba de Proctor modificado; se determinaron las propiedades mecánicas de las mezclas y su peso unitario.

A partir de los resultados obtenidos, se resalta que propiedades como la densidad, la densidad aparente específica, la absorción de agua (más del doble) y la abrasión de Los Ángeles exhiben valores mayores en los agregados de escoria que en los agregados pétreos. Entre otras características, se determinó que el contenido de CaO libre en la escoria era de

25.94%, tenía alta densidad, pero baja absorción de agua y baja porosidad en comparación con lo que han encontrado otros autores. La mezcla con 100% de escoria presentó un mayor potencial de expansión que las demás mezclas, sin embargo, su valor máximo fue de 0.078% después de 6 días estando por debajo de los límites de la norma ASTM D4792 según el cual debe ser 0.5%; entonces, las mezclas de concreto donde se usa escoria negra son estables ante reacciones de hidratación siendo viables para su uso en pavimentos.

De otro lado, las tendencias de la resistencia a la compresión y de la resistencia a la tracción mostraron un aumento con el transcurso de la edad, siendo menor a los 3 días frente a los 91 días, pero disminuyeron a medida que se aumentaba el porcentaje de escoria en la mezcla. En cuanto al módulo de elasticidad, su valor disminuyó ligeramente con el aumento del contenido de escoria negra y una sustitución del 40% de cenizas volantes. Lo anterior, se explicó mediante la textura rugosa de los agregados reciclados y su influencia en la una mala zona de transición interfacial entre éstos y la pasta de cemento. Lam et al. (2017) concluyeron que, pese a las variaciones de las propiedades de las mezclas experimentales, se cumplen con los requerimientos para el concreto en pavimentos, siendo aquellas mezclas con agregados de escoria y un 20% de cenizas volantes la mejor alternativa.

González-Ortega et al. (2019) desarrollaron un trabajo de investigación fundamentado en la evaluación de la durabilidad, la estabilidad y el potencial de contaminación de los concretos que se fabrican con escorias de horno de arco eléctrico (ArcelorMittal en Zaragoza, España). Como parte de su metodología, los autores diseñaron y fabricaron 6 mezclas diferentes de concreto donde una (1) de ellas se preparó con caliza, una (1) con barita y las cuatro (4) restantes con escoria. Las pruebas se realizaron en dos fases, primero, para la determinación de las propiedades del concreto (trabajabilidad, contenido de aire, densidad,

resistencia a la compresión y módulo de elasticidad), y segundo, para la determinación de la estabilidad, la durabilidad a 3 años (profundidad de penetración bajo presión, ciclos de mojado-secado y congelación-descongelación, exposición ambiental) y el potencial de lixiviación.

De acuerdo con sus resultados, la escoria utilizada como agregado tenía un amplio rango de tamaños (0/6.3, 6.3/12.5 y 12.5/20), además, tenía un potencial de expansión significativo debido a la presencia de nódulos de hierro, así como óxidos de calcio y magnesio no reactivo. Asimismo, las mezclas de concreto con agregados de escoria exhibieron mayor absorción de agua y escasez 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.

En suma, para las mezclas de concreto con escoria se obtuvieron módulos de elasticidad con porcentajes entre un 13% y un 66% mayores que las mezclas con caliza y barita; esto se debe a que, si bien los agregados de escoria son más porosos, también tienen una mayor dureza que los otros tipos de agregados usados en las mezclas. Con respecto a la durabilidad, la estabilidad y el potencial de contaminación, los autores demostraron que, con un tratamiento adecuado, el concreto fabricado con escoria es capaz de cumplir con los requerimientos normativos que se han establecido para los concretos estructurales convencionales.

Tamayo et al. (2020) orientaron su investigación 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. Bajo este panorama, su metodología incluyó la caracterización física, mecánica y de la durabilidad tanto de los agregados reciclados, es decir, la escoria, y los agregados naturales, como de las mezclas experimentales de concreto donde se usaron proporciones de 0%, 20%, 50% y hasta 100% en volumen de escoria: se empleó el método Faury para su diseño. Los agregados naturales usados fueron grava caliza y arena silíceas, la escoria negra tenía 2 meses de antigüedad y el tamaño del triturado era de 0/25 mm.

En lo que respecta a la caracterización de los agregados naturales y la escoria, se reportó una similitud en los valores de densidad, densidad aparente y en el desgaste de Los Ángeles, sin embargo, al igual que en otros estudios, se observó una mayor absorción de agua en el agregado reciclado siendo más del doble que en los agregados naturales gruesos y cumplía con las especificaciones españolas para concretos estructurales. Ahora bien, el índice de forma de las escorias es ligeramente menor que el de los agregados naturales y tienen una superficie expuesta que es cavernosa que exige mayores cantidades de pasta o mortero.

Para las mezclas de concreto, los autores informaron que, según sus análisis, las densidades en masa incrementaban a medida que se aumentaba el contenido de escoria negra. Del mismo modo, se evidenció un incremento en la porosidad del material y en la absorción de agua, lo cual se relaciona con una mayor porosidad exhibida en los agregados reciclados. Frente a la resistencia a la compresión, los autores sugieren que la porosidad es un factor negativo, sin embargo, la pérdida de resistencia no fue de gran magnitud. Luego, el tiempo

de curado en el concreto se estableció como un aspecto relevante a la hora de evaluar la resistencia del material, pues si bien a los 7 días se evidenció una disminución del 5.5%, a los 28 días se obtuvo un incremento relativo del 21% y a los 91 días no se notaron cambios.

Entre otros resultados, Tamayo et al. (2020) encontraron que la resistencia a la tracción era similar en las mezclas con escoria y la mezcla de referencia atribuyéndole este hecho a la rugosidad de los agregados reciclados que facilita la adherencia con la pasta o el mortero, además, se determinó una relación inversa entre el módulo de elasticidad y el porcentaje de agregados reemplazados con escoria (0% con 40GPa, 100% con 33 GPa), y un incremento del 7% en la densidad de las mezclas de concreto con escoria frente a la mezcla de referencia a razón de su naturaleza férrea. La conclusión general de su trabajo indica que los resultados obtenidos tanto en las pruebas mecánicas como de durabilidad son satisfactorios dejando en evidencia el potencial que tiene el concreto estructural fabricado con agregados reciclables como la escoria negra en la industria del acero.

A nivel nacional, se cita el trabajo desarrollado por Mayor et al. (2020), quienes evaluaron el uso de la escoria de horno de arco eléctrico proveniente de una siderúrgica colombiana (SIDOC S.A.) como agregado fino en la producción de morteros estructurales en comparación con un agregado natural extraído del río Cauca. Su metodología fue de corte experimental para la caracterización de los agregados y el cemento, al igual que para la evaluación de las propiedades mecánicas de las mezclas de mortero con las proporciones propuestas considerando que la densidad de los agregados siderúrgicos era mayor a la de los agregados naturales. Cabe señalar que los análisis se realizaron tanto para la mezcla en estado plástico, como en estado endurecido.

En ese orden, los resultados obtenidos por los autores para la mezcla en estado plástico indicaron que la incorporación de la escoria siderúrgica incrementó la fluidez y la trabajabilidad de ésta. Luego, con respecto al estado endurecido, se determinó que las muestras de mortero preparadas con escorias presentaban una mayor resistencia a la compresión (41.06 ± 3.64 MPa) frente a aquellas mezclas preparadas con agregado natural (35.43 ± 3.01 MPa), aumentando con el tiempo (7, 28 y 56 días) y superando la resistencia de la dosificación (35 MPa a los 7 días). La misma tendencia se observó para la resistencia a la flexión donde los valores oscilaron entre 6.46 ± 0.74 MPa a los 7 días y 8.12 ± 1.12 MPa a los 56 días.

A modo de conclusión, se sugiere que, aunque los agregados finos de escoria no cumplen con los requerimientos granulométricos, las propiedades mecánicas que exhiben dejan entrever su potencial y viabilidad de uso en la fabricación de morteros y concretos. Sin embargo, se recomienda profundizar en la evaluación de otras propiedades que son de gran relevancia tales como la microestructura, la durabilidad, y la capacidad de expansión y contracción del material, las cuales repercuten en la estabilidad del material y la seguridad de su uso.

En general, tal como lo señala Sánchez (2016), los estudios e investigaciones que se han adelantado en las últimas décadas sobre las propiedades de las escorias del horno de arco eléctrico sugieren que éstas pueden ser usadas en las capas granulares de los mezclados, así como en capas asfálticas y concretos hidráulicos para pavimentos gracias a su resistencia mecánica y a su poco potencial expansivo, el cual es inferior al 1%. Mediante la revisión de literatura, fue posible rastrear más antecedentes donde se evalúan las propiedades mecánicas, la composición química y la durabilidad de los concretos hidráulicos que se fabrican con

escoria negra, (Arribas et al., 2015; Faleschini et al., 2015; Santos et al., 2019; Domínguez y Ferraro, 2020), aun así, se observa un mayor énfasis en la resistencia a la compresión y en la resistencia a la tracción que en la resistencia a la flexión.

5.2. Marco teórico y conceptual

En este apartado, se describen algunos aspectos conceptuales relevantes para la investigación asociados al acero y su producción, a las escorias de la industria del acero y el diseño de los concretos.

5.2.1. *El acero y su producción*

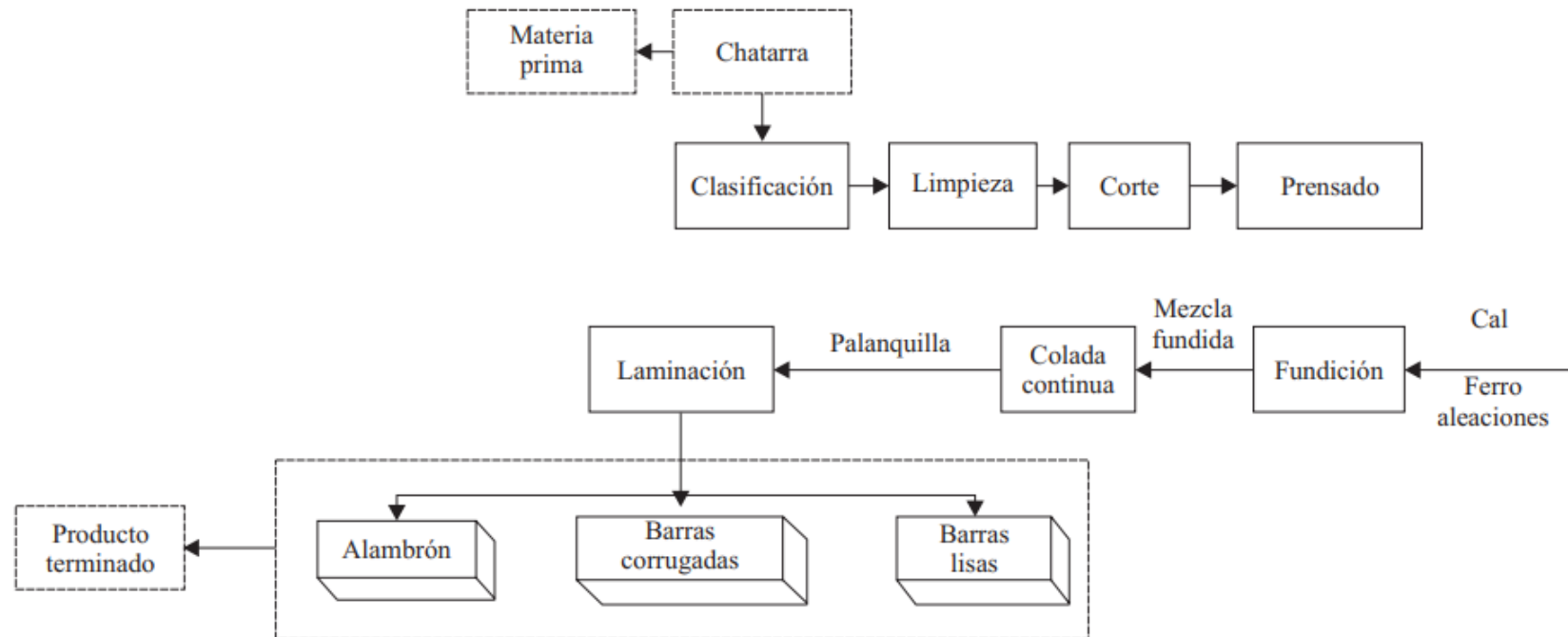
El acero es una aleación de hierro y carbono principalmente, aunque también puede contener otros elementos como el azufre, el fósforo, el manganeso y el silicio; su contenido de carbono varía de 0.1% a 0.9%, y de ello, depende en gran medida sus propiedades mecánicas, (Frómeta y Delás, 2009). Constituye un material muy importante para el sector de las construcciones en la actualidad, por ejemplo, cuando hace parte del hormigón armado es capaz de absorber la energía proveniente de las deformaciones ocasionadas por movimientos sísmicos en las edificaciones debido a su ductilidad, (Frómeta y Delás, 2009).

La cadena productiva de la industria siderúrgica está conformada por tres eslabones, siendo éstos, las materias primas, los productos intermedios y los productos terminados. En el primer eslabón, se incluye la extracción de minerales ferrosos, la obtención del acero crudo y la chatarra, mientras que, en los otros eslabones, aparecen los aceros por bloques, barras, varillas, láminas o alambrón, que sirven como insumos para otras industrias como la metalmecánica y las construcciones, (Camacho, 2011).

En ese orden, se reconocen dos rutas de producción. La primera se denomina ruta integrada y consta de la obtención del acero a partir de una mezcla de minerales de hierro (hematita, siderita, magnetita y/o limolita), coque para promover la reducción y cal para separar las impurezas en un alto horno, de lo cual, se obtiene el hierro fundido con escoria en inicialmente (arrabio, primera fusión), (Orrego, 2015; Rojas-Manzano et al., 2021). Luego, el arrabio se puede llevar a una operación posterior de refinado para obtener el acero crudo adicionando oxígeno para disminuir los excesos de carbono y definir sus propiedades, (Rojas-Manzano et al., 2021). Esta ruta es integrada debido a que suele estar arraigada a la extracción y transformación de los minerales de hierro y del carbón.

Por otra parte, la otra ruta denominada semiintegrada, consta de la obtención de acero a partir de la fundición de chatarra ferrosa como materia prima en un horno de arco eléctrico con cal en un primer momento, y después, se realiza una operación de refinado adicionando otros agentes o sustancias (ferroaleaciones) que permiten controlar la composición química y conseguir las propiedades deseadas en el material, (Orrego, 2015; Rojas-Manzano et al., 2021). Gutiérrez et al. (2010) explican ampliamente el proceso para obtener productos de acero intermedios y terminados, señalando que se requiere separar, limpiar, cortar y prensar la chatarra en bloques para llevarlos al horno, elevar la temperatura a 1800°C, y luego, pasar el acero fundido por una colada continua para obtener palanquillas (producto intermedio), las cuales se pueden procesar en caliente o en frío para llegar a productos terminados como el alambón y las barras corrugadas. A continuación, la Figura 1 presenta el esquema de producción de acero por la ruta semiintegrada:

Figura 1. Ruta semiintegrada para la producción de acero



Fuente: Gutiérrez et al. (2010).

En lo referente a los procesos de producción, Suárez (2018) distingue, primero, la etapa de solidificación del material después de alcanzar la composición y la pureza deseada, y luego, la etapa de conformación mecánica en la cual los productos intermedios como las palanquillas se llevan a su forma final por medio de tratamientos térmicos, forjado, trefilación y figuración para lograr especificaciones de dureza, ductilidad, resistencia a la tracción, maleabilidad y tenacidad en el material.

Finalmente, considerando que en Colombia se ha adoptado principalmente la ruta semiintegrada para obtener acero, la cadena de abastecimiento se caracteriza por tener también tres eslabones bien diferenciados según, Gutiérrez et al. (2010):

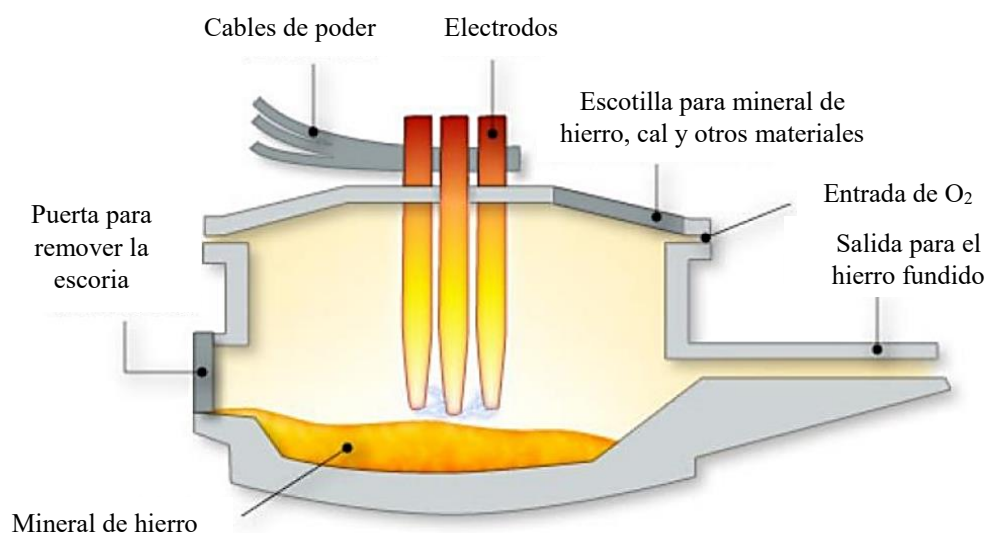
- **Fuentes y proveedores:** se refiere a todo el conjunto de agentes que se dedican a comercializar la chatarra, previamente clasificada, tanto a nivel nacional como a nivel internacional.
- **Productores:** son todas aquellas plantas siderúrgicas, acerías o plantas de laminadoras donde la chatarra se procesa para obtener otros productos intermedios y terminados.
- **Distribuidores:** son agentes, personas naturales o empresas, que comercializan los productos de acero, transportándolos y entregándolos a clientes de otras industrias que los usan como materia prima.

5.2.1.1. Horno de arco eléctrico (HAE)

De acuerdo con Molino (2016) y Jiménez (2021), el horno de arco eléctrico (HAE) es un gran recipiente con forma cilíndrica recubierto con material refractario que entra en contacto con una bóveda móvil que contendrá el material fundido (acero líquido con

escorias), y a su vez, cuenta con paneles de refrigeración con agua. Por lo general, tienen tres orificios en la parte superior para ubicar los electrodos de grafito por donde se conducen altas corrientes hacia el material de la carga, y los cuales, pueden ajustarse para regular la distancia con respecto al fundido a medida que se van consumiendo. Asimismo, el horno tiene un orificio para extraer y/o captar gases, y un orificio inferior para permitir la recolección de la colada. Se destaca que las temperaturas que se alcanzan en el horno oscilan entre los 1600 y los 1800°C. La Figura 2 presenta una representación del HAE.

Figura 2. Representación de un HAE



Fuente: Padilla citado por Jiménez (2021).

De otro lado, cuando el material de carga se funde, se pasa a un horno de cuchara, un horno eléctrico que funciona con corriente alterna, para eliminar sulfuros y óxidos remanentes en el producto, (Jiménez, 2021). De allí, se procede a pasar el fundido a través

de la máquina de colada continua para obtener el sólido intermedio como parte de la cadena productiva.

En lo que se refiere a eficiencia, si bien, el consumo de los electrodos de grafito puede representar hasta un 10% de los costos de la operación totales, incorporar el horno de arco eléctrico en la producción tiene como objetivo maximizar los volúmenes a un costo mínimo, lo que implica, por ejemplo, trabajar con máximas potencias para reducir los tiempos, (Jiménez, 2021). Aun así, los ciclos comunes de este tipo de hornos son de 2-3 horas cuando su capacidad es de 100 a 130 toneladas de material, (Andrei et al., 2011). La Tabla 1 describe algunas precisiones sobre aspectos relevantes de los HAE tales como el material de carga, los electrodos, los transformadores de potencia y las operaciones.

Tabla 1. Consideraciones sobre los HAE

Aspectos para considerar	Descripción
Material de carga	La materia prima para los HEA es la chatarra férrica o el arrabio.
Armazón	Estructura metálica con recubrimiento refractario resistente a las altas temperaturas a las que se opera. Se requiere refrigeración del recubrimiento por medio del flujo de agua a través de tuberías o conductos.
Electrodos	Se requieren electrodos de grafito para que no se fundan completamente con las altas temperaturas que se alcanzan. Son gruesos con un diámetro de 700-760 mm y con una longitud que puede oscilar de 3 a 12 m. Tienen baja resistividad eléctrica y son los encargados de entregar la potencia en forma de arco eléctrico al material de carga.
Transformador de potencia	Es una parte esencial del sistema eléctrico ya que suministra la energía para que el HAE funcione. Su función es transformar la corriente de alta tensión y baja intensidad que se recibe de las fuentes convencionales de electricidad en las plantas, a corrientes de baja tensión y alta intensidad, a raíz de lo cual, se aprovecha el efecto Joule. Los valores de referencia para un HAE regular comprenden un transformador de 60 MVA, voltajes secundarios de 300-900 voltios, y corrientes secundarias de ~100 kA. Debe soportar una sobrecarga de hasta 20% en la fase de fusión.
Operación	Fusión
	Los electrodos entran en contacto con el material de la carga cerrando el circuito y generando un cortocircuito intencional. Después, se elevan los electrodos, se forma el arco y el calor liberado es aprovechado para la fundición. La longitud del arco eléctrico y la cantidad de valor son fluctuantes debido al movimiento de los electrodos y de la chatarra, incluso puede apagarse varias veces.
	Afino
	El acero líquido se somete a un proceso de transformación de sus propiedades físicas y químicas. Se controla su composición, se eliminan impurezas y se buscan las propiedades según las especificaciones del tipo de acero. El arco es estable, las fluctuaciones de voltaje y corriente son menores.

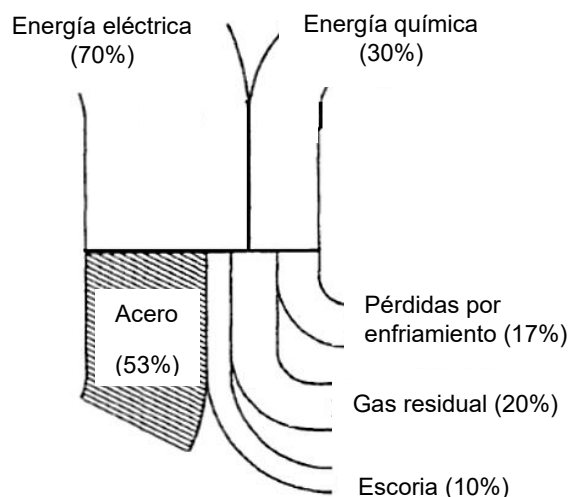
Fuente: Elaborado a partir de Andrei et al. (2011) y Jiménez (2021).

Para finalizar, se hace alusión al fenómeno que fundamenta el funcionamiento de los HAE: el arco eléctrico o voltaico. Se trata de una descarga eléctrica en un medio gaseoso que se produce en condiciones de alta corriente y bajo voltaje generando grandes cantidades de energía que se manifiesta en forma de calor, radiación, chispas y ruido, (Jiménez, 2021; Gutiérrez, 2023).

A pesar de que puede producirse mediante corrientes alternas o corrientes continuas, su sentido determina tanto el desplazamiento como el impacto de los transportadores de carga -iones o electrones- en los electros; por ejemplo, se puede ocasionar mayor desgaste o recalentamiento en alguno de los electrodos, o deterioros en las piezas metálicas del horno, (Gutiérrez, 2023). No obstante, un HAE típico se usa con corriente alterna con tres electrodos donde el desgaste de los electrodos es aproximadamente equitativo, aunque ello no implica que sea la opción que mejor funciona; falta desarrollo e investigación, (Gutiérrez, 2023).

Jiménez (2021) explica que en los arcos hay un crecimiento evidente de la densidad de corriente, lo que se corresponde con un incremento en la temperatura debido al efecto Joule. Por lo tanto, se puede afirmar que los HAE fusionan el material de carga por una transferencia de energía eléctrica y su conversión a energía térmica. La Figura 3 muestra un diagrama que elaboraron Andrei et al. (2011) a cerca de los patrones de energía en un HAE.

Figura 3. Diagrama de patrones energéticos en un HAE



Fuente: Andrei et al. (2011).

De acuerdo con los autores, en la entrada, el 70 % del suministro de energía es eléctrica y el 30% excedente proviene de la energía química de reacciones como las oxidaciones. A la salida, se estima que el 53% de la energía sale con junto con el líquido fundido y el resto se pierde en la escoria, los gases residuales y la refrigeración.

5.2.2. La industria del acero

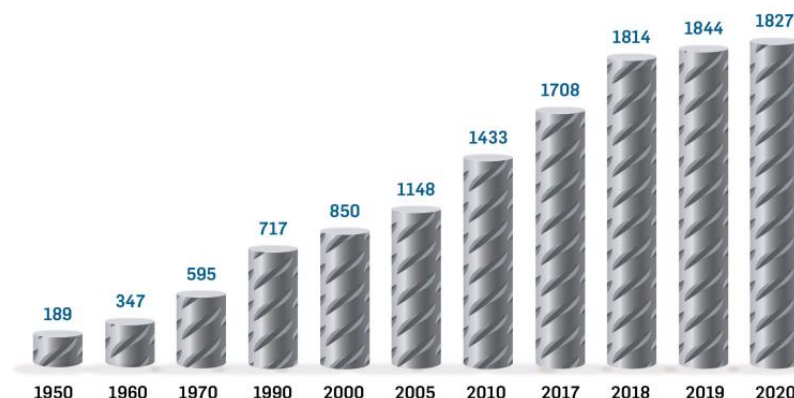
A nivel global, el mercado siderúrgico ha tenido tres momentos claves desde la segunda mitad del siglo XX hasta la actualidad de acuerdo con Restrepo y Taborda (2017):

- i. El primer momento, se remite al periodo posterior a la Segunda Guerra Mundial hasta 1975, donde la producción del acero creció en más de un 350% a razón de los procesos de reconstrucción de las naciones en la postguerra y el desarrollo en occidente a través del desarrollo industrial.

- ii. El segundo momento, se refiere a las últimas décadas del siglo XX, donde la producción del acero se redujo a un 132% aproximadamente debido a la desaceleración del consumo y al proceso de reconversión de la industria siderúrgica causado por un ambiente competitivo que se caracterizó por la especialización de las fábricas, el cierre de aquellas plantas obsoletas y poco productivas, la adopción de prácticas desleales, la aparición de mercados emergentes, la tecnificación y la incorporación de nueva tecnología, entre otros, que cambiaron el escenario por completo.
- iii. El tercer momento, que se ha dado en el transcurso del siglo XXI, el comportamiento general ha sido creciente; los mercados emergentes han suplido la demanda desatendida por las potencias como una forma para apalancar su desarrollo.

La ANDI (2018) explica que el mercado global ha cambiado drásticamente desde el año 2000, particularmente, porque el papel de China en la industria del acero implicó un rebalanceo en la participación de todos los actores del sector a nivel mundial. Solo en China, entre el año 2000 y el año 2017, el crecimiento en la producción de acero fue de 545% y su capacidad productiva incrementó en un 600%, lo cual ha permitido que, a la fecha, aproximadamente el 50% de la oferta provenga de este país, (ANDI, 2018). Incluso en los últimos reportes sobre la industria del acero, se deja en evidencia que China, gracias a su protagonismo, ha amortiguado los altibajos en la producción global y su impacto económico, por ejemplo, en escenarios críticos como el de la pandemia por COVID-19, (ANDI, 2021). La Figura 4 muestra el crecimiento histórico que ha tenido la producción de acero en todo el mundo desde 1950.

Figura 4. Producción histórica de acero crudo



Fuente: World Steel citado por ANDI (2021).

En lo que respecta a los mercados regionales y locales de acero, es preciso señalar que suelen estar amenazados por las economías tradicionales predominantes como Estados Unidos y China debido a sus diferencias en cuanto a capacidades de infraestructura, tecnología e inversión, que, a su vez, han determinado sus capacidades y volúmenes de producción. No obstante, las políticas macroeconómicas adoptadas por los Estados Latinoamericanos desde la década de los años noventa, han sido útiles como estrategias de protección para los mercados locales y sus economías, en especial, gracias a la privatización de las empresas de la industria siderúrgica, (Restrepo y Taborda, 2017). Lo cierto, es que tanto a nivel de Latinoamérica como en Colombia la industria del acero ha estado creciendo de manera significativa y en paralelo al crecimiento del sector de las construcciones donde se usa como materia prima para edificaciones e infraestructura, (ANDI, 2018).

Ante el panorama expuesto, se ha buscado aprovechar las oportunidades forjando alianzas estratégicas para enlazar las industrias siderúrgicas con los constructores; si bien, la producción nacional es capaz de abastecer la demanda de este tipo de proyectos y la calidad

del acero cumple con todas las especificaciones técnicas que se exigen, se reconoce que persisten prácticas de competencia desleal, elusión arancelaria e importaciones de productos con menor calidad, los cuales constituyen amenazas para la industria del acero en Colombia (Toro, 2016; ANI, 2020). Cabe resaltar que dichas alianzas han implicado un estímulo para las inversiones en programas de RSE y un incremento en el pago de impuestos que se suman a los beneficios que se ofrecen a la sociedad.

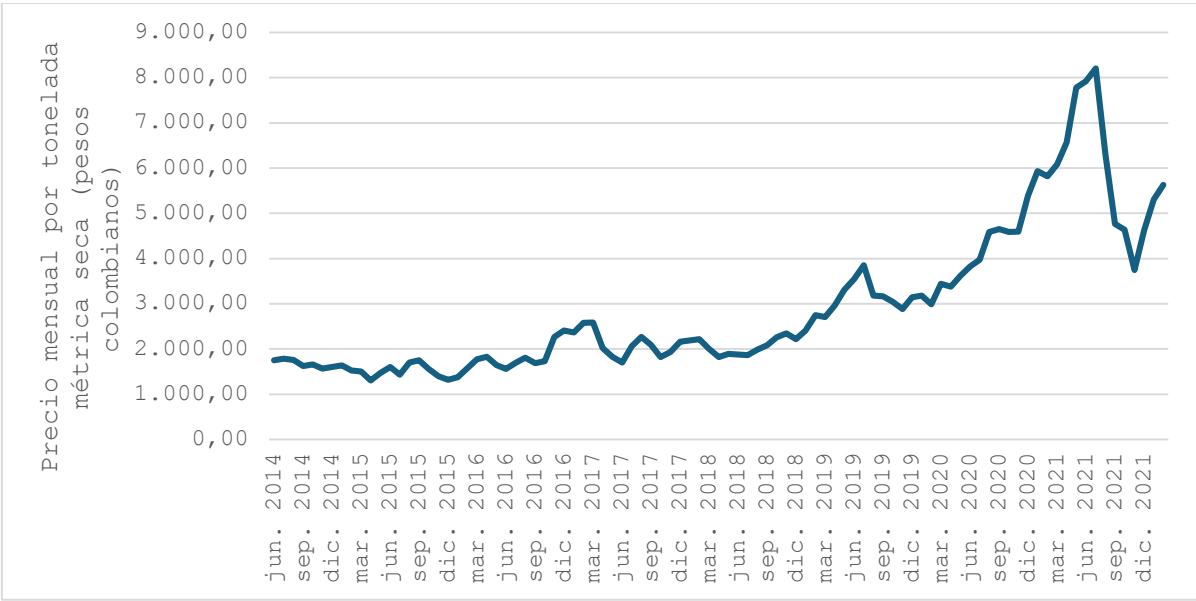
Entre otras cifras de la industria del acero en la región, ALACERO (2022) señala que la producción en Latinoamérica representa cerca del 3.3% del mercado global de acero crudo, aunque parezca poco, se asocia a más de 1.3 millones de empleos directos e indirectos en 106 unidades productivas. La elección de las rutas productivas depende de la disponibilidad de recursos como el carbón, el hierro (o minerales ferrosos), el carbón metalúrgico, la chatarra, la electricidad y el gas natural en cada país. Así pues, en términos de producción, lidera Brasil con más de 36 Mt de acero anuales, seguido de México (18.5 Mt), Argentina (4.9 Mt), Colombia (1.3 Mt) y Chile (1.3 Mt) según las cifras reportadas para el año 2021 (ALACERO, 2022).

Ahora bien, la producción industrial del acero en Colombia se concentra en un clúster de 5 empresas siderúrgicas, siendo éstas, Acerías Paz del Río, Gerdau-Diaco, GSR, Sidoc y Ternium; se cuenta con 5 plantas de acería y 12 plantas de laminación en caliente que operan en el territorio nacional constituyendo una capacidad instalada de más de 2.2 millones de toneladas (ANDI, 2021). Aunque se manejan dos procesos productivos, uno a base de minerales de hierro y otro a partir de chatarra, la siderúrgica colombiana se caracteriza por ser ejemplo de economía circular debido a que el reciclaje de chatarra con hornos eléctricos cada vez cobra más importancia reemplazando el uso de hierro y de los altos hornos (ANDI,

2021). De hecho, se reporta que de las cinco siderúrgicas en cuestión, todas usan hornos eléctricos, y solo Acerías Paz de Río continúa usando las dos vías de producción (Portafolio, 2019).

Lo anterior, implica que la industria nacional de acero no dependa de los precios del hierro y los minerales ferrosos cuyo precio ha estado creciendo con el paso del tiempo; en contraste, si depende mayoritariamente del precio de la chatarra y de la disponibilidad de chatarra como insumo, por lo cual no es extraño que se importe desde otros mercados para suplir la demanda doméstica (Portafolio, 2019; ANDI, 2021; ANDI, 2022). La Figura 5 muestra el precio de la tonelada de hierro desde el año 2014 (jun) hasta 2022 (feb), donde la tendencia general deja en evidencia un incremento progresivo que alcanza su máximo en abril de 2021.

Figura 5. Precio de la tonelada de hierro jun 2014-feb 2022



Fuente: Indexmundi.com

5.2.3. Escorias en la industria del acero

De acuerdo con Mayor et al. (2020), la escoria es un producto residual que inevitablemente se obtiene a partir de la fabricación de acero, ya sea que se trate del proceso que comprende la ruta integrada, es decir, desde la extracción de minerales de hierro, o de aquel que se basa en la ruta semiintegrada donde se recurre al reciclaje de chatarra ferrosa. Aun así, resulta relevante aclarar que la escoria producida tiene diferentes características, según sea la ruta de fabricación pues cambian aspectos tales como las condiciones de enfriamiento y la composición química de los insumos (Mayor et al., 2020). En ese orden de ideas, la clasificación de las escorias se fundamenta en el tipo de horno en el que se producen como sigue:

- **Escoria del alto horno:** son escorias que se generan a partir de los minerales de hierro, por lo cual, se componen por óxidos de calcio, magnesio, silicio y aluminio en un 95%; sus propiedades dependen de la velocidad de enfriamiento (Rojas-Manzano et al., 2021). Entre otras características, tienen un elevado contenido de la fase vítrea (>80%) y cuando se enfría lentamente, aparecen fases cristalinas de minerales como la gehlenita, la aquermanita y el silicato bicálcico (Suárez, 2018).
- **Escorias del horno eléctrico (o escorias negras):** son escorias de acero enriquecidas en óxidos de calcio, magnesio y silicio, además, se caracterizan por tener óxidos de hierro en proporciones que oscilan entre 20 y 40%, siendo la sustancia responsable de una coloración oscura (Suárez, 2018).
- **Escorias del horno cuchara (o escorias blancas):** al tratarse de un proceso de refinamiento, en el horno suceden diferentes cosas como la remoción del

oxígeno agregando silicio, manganeso y aluminio, el ajuste del contenido de carbono con la adición de ferroaleaciones y coque, la eliminación de impurezas con gases como el argón o el nitrógeno, y la desulfuración con cal cálcica; así, se reducen la cantidad de óxidos de manganeso y hierro dejando un color más claro en la escoria (Suárez, 2018).

5.2.4. *Los concretos y sus componentes*

De acuerdo con Porrero et al. (2014), el concreto, también denominado hormigón, es un material constituido por una mezcla de agregados y pasta. Así, mientras los agregados constan de materiales pétreos como la arena (fino) y la grava (grueso) que sirven como relleno, la pasta -o cemento- es un material pastoso con propiedades cementantes que se prepara con un aglomerante o conglomerante y agua, el cual, tiene como función unir los agregados (Porrero et al., 2014; Matallana, 2023). En ocasiones, se le agrega aditivos que son sustancias con las que se busca darles ciertas propiedades especiales al concreto y también puede contener aire atrapado natural o intencionalmente (Matallana, 2023).

La Tabla 2, presenta la composición aproximada del concreto y se describen las funciones de cada uno de sus componentes.

Tabla 2. Composición aproximada del concreto

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).

Tal como lo describe Matallana (2023), cuando el concreto es fresco, su comportamiento es plástico, dócil, manejable y trabajable permitiendo que se dé la forma que se desea conservando su homogeneidad, por ejemplo, en construcciones en vigas, columnas o losas, entre otros. Sin embargo, cuando transcurre el tiempo, el concreto se endurece y adquiere propiedades de interés como una gran resistencia a esfuerzos mecánicos y durabilidad (Matallana, 2023).

Por lo general, es indeseable que en los concretos frescos se segreguen las partículas o haya exudación de agua porque el material pierde la uniformidad de la composición y sus propiedades, además, en los concretos endurecidos la resistencia a esfuerzos compresivos es, quizás, una de las propiedades más relevantes para determinar su calidad en el contexto de las construcciones (Matallana, 2023). Por su parte, Kosmatka et al. (2004) hace referencia a la calidad del concreto basándose en su confección considerando que cada grano de agregado debe estar, idealmente, cubierto por completo de pasta, así como todos los espacios entre los granos del agregado; luego, un exceso en la cantidad de agua diluye el agente cementante alterando las propiedades del material negativamente.

Ahora bien, dado que los agregados constituyen una proporción significativa de los concretos, sus características (distribución de tamaños, redondez, esfericidad, forma, densidad, adherencia a la pasta, resistencia, dureza, tenacidad, etc.) y selección son muy importantes para efectos de consistencia y calidad ya que influye en las propiedades del material tanto en su estado plástico como en su estado endurecido (Gutiérrez, 2003; Kosmatka et al., 2004; Matallana, 2023). Para ilustrar, la presencia de una gran cantidad de partículas con tamaños menores a 0.074 mm como limos, arcillas y polvos son perjudiciales

en los concretos debido a que interfieren en la adherencia agregado-cemento, a su vez, altos contenidos de materia orgánica -humus- interfieren en el fraguado (Gutiérrez, 2003).

Bajo éstas consideraciones, la Tabla 3 presentan tres criterios de clasificación básicos que son usados en los agregados.

Tabla 3. Clasificación de los agregados

Clasificación	Tipos	Características
Según su procedencia	Naturales	Se obtienen a través de la explotación de canteras/bancos de material o del arrastre de material en fuentes hídricas como los ríos. Sus características físicas, químicas y mecánicas (porosidad, textura, resistencia, composición, estabilidad, etc.) dependen del tipo de roca madre, es decir, sedimentaria, ígnea o metamórfica. La fragmentación, entonces, puede ser por intemperismo y abrasión, o debido a procesos mecánicos desarrollados por el hombre.
	Artificiales	Se refiere a aquellos tipos de agregados que se obtienen en procesos industriales o son productos de ellos. Algunos ejemplos son las arcillas expandidas, las escorias, limaduras o residuos agrícolas.
Según su tamaño de grano	Fracción fina	La arcilla o el limo con tamaños entre 0.002 y 0.074 mm.
	Agregado fino	Arenas con tamaños de grano entre 0.074 y 4.76 mm.
	Agregado grueso	Gravilla, grava, piedras y piedras bola con tamaños de grano entre 4.76 y 152.4 mm.
Según su densidad	Ligeros, livianos	Agregados con densidades entre 480 y 1040 kg/m ³
	Normales	Agregados con densidades entre 1300-1600 kg/m ³

Fuente: Gutiérrez (2003), Porrero et al. (2014).

Con respecto al cemento, éste es un componente activo del concreto, el cual, también tiene influencia sobre las propiedades del material pese a que su proporción en la mezcla es mucho menor que la de los agregados pétreos. Cuando se hace referencia al cemento, se hace alusión implícitamente al cemento Portland debido a que es un producto aglomerante que prácticamente es exclusivo para su uso a nivel estructural, aunque también hay otros tipos de aglomerantes con propiedades cementantes que son usados en construcciones como los cementos de escorias, los cementos puzolánicos o los cementos supersulfatados, entre otros (Porrero et al., 2014).

Según Kosmatka et al. (2004), los cementos tipo Portland son cementos hidráulicos y están compuestos de silicatos de calcio que tienen la capacidad de fraguar y endurecerse cuando reaccionan con agua formando una pasta; una vez entra en contacto el cemento y el agua, sobre la superficie de cada partícula se genera una capa fibrosa que se propaga poco a poco hasta encontrarse con la capa fibrosa de otras partículas, y de esta manera es que se genera la adherencia en el material. Ahora, debido a que las fibras siguen en crecimiento, el material se va volviendo más rígido y se endurece con el paso del tiempo desarrollando progresivamente resistencia. Cabe aclarar que como se trata de una reacción de hidratación, las condiciones como la temperatura y la humedad del ambiente influyen en el tiempo que dura la reacción, pues si bien puede culminar después de un mes, también puede continuar lentamente por periodos de tiempo más largos.

Otros autores señalan que las reacciones que tienen lugar son la hidrólisis y la hidratación de los constituyentes del cemento, siendo el endurecimiento causa directa de la formación de silicatos y aluminatos cálcicos hidratados, aunque existen diferentes teorías y estudios que han buscado establecer la composición exacta para explicar mejor su

comportamiento (Sanjuán y Chinchón, 2014). A nivel macroscópico y en conformidad con la normativa europea, la composición del cemento Portland en la actualidad, se distingue por la presencia de compuestos principales y minoritarios como se describe en la Tabla 4:

Tabla 4. Componentes del cemento Portland

Clasificación	Componente	Descripción
Componentes principales	Clinker de cemento Portland	Se obtiene a través de un proceso de sinterización de una mezcla homogénea que consta de caliza, arcillas, arenas y compuestos ferrosos, entre otros. Su composición química, entonces, resulta ser: silicatos tricálcicos y bicálcicos, ferritoaluminatos, aluminatos, cal libre, periclasa, óxido de manganeso libre y óxidos de metales alcalinos.
	Escorias granulares del alto horno	Se trata de las escorias que provienen de la fusión de minerales de hierro en el alto horno, seguido de un enfriamiento rápido. Al menos dos terceras partes de las escorias son vítreas, y gracias a ello, tienen propiedades hidráulicas tras una adecuada activación. En cuanto a su composición, al menos dos terceras partes deben ser óxido de calcio, óxido de magnesio y dióxido de silicio, y el restante suele ser principalmente óxido de aluminio con otros compuestos en cantidades mucho menores. Las proporciones de cada óxido son relevantes a la hora de examinar la reactividad, las propiedades hidráulicas, la resistencia y la formación vítrea.
	Puzolanas	Los materiales puzolánicos son sustancias que se componen de sílice o sílice-aluminosa, los cuales se pueden incorporar al cemento para mejorar sus propiedades tales como una mayor durabilidad y resistencia química, una mayor compacidad, impermeabilidad, menores calores de hidratación y control sobre la expansión. Estos materiales por lo general se componen de dióxido de silicio y dióxido de aluminio, entre otros óxidos en menores cantidades.
	Cenizas volantes	Son aquellas que se obtienen a partir de la precipitación electrostática o mecánica de material particulado que se arrastra en los flujos gaseosos en hornos de carbón en centrales termoeléctricas. Son de naturaleza cálcica o silíceas, por lo cual pueden tener propiedades

	puzolánicas e hidráulicas. Una precisión que se realiza, es que no se deben usar otros tipos de cenizas en cementos.
Esquisto calcinado	Se producen en hornos especiales con temperaturas de $\sim 800^{\circ}\text{C}$, y debido a su composición original y su proceso de producción, suele contener fases del Clinker y proporciones mayores de óxidos puzolánicos.
Caliza	Su papel es actuar como relleno en el cemento, no es un componente activo y no participa en las reacciones que conllevan al fraguado/endurecimiento. No debe exceder el 20% en peso y deben cumplir con una serie de exigencias en cuanto al contenido de carbonato de calcio, arcillas y materia orgánica para que su adición no interfiera en las propiedades que se buscan en el cemento.
Humo de sílice	Se produce cuando se reduce el cuarzo con gran pureza en hornos de arco eléctrico usando carbón. Se trata de un material particulado muy fino que contiene aproximadamente un 85% en masa de dióxido de silicio en estado amorfo. Se usa como componente principal del cemento, pero también como aditivo en hormigón de alta resistencia y hormigón de alta prestación, tiene propiedades puzolánicas y debe cumplirse ciertas exigencias con referencia a la calcinación y la superficie específica según el modelo BET.
Componentes minoritarios	Se refiere a aquellos componentes adicionales que provienen de fuentes naturales o de procesos relacionados con la fabricación del Clinker o el cemento, siendo su proporción limitada a un máximo del 5%. Debido a sus características y su contenido, no afectan mucho la demanda de agua o la resistencia, más bien tienen un efecto en las propiedades físicas como la docilidad del material.
Sulfato de calcio	Es un agente químico que se usa para ejercer control sobre el fraguado y activan el desarrollo de la resistencia en el material. A causa del volumen, su contenido en el cemento oscila entre 3-4% sobre el total.
Aditivos	Son sustancias o agentes diferentes a los mencionados previamente, los cuales, se adicionan para mejorar tanto la fabricación como las propiedades mismas del cemento -nunca perjudicar-. Su contenido no debe superar el 1% y cuando se trate de aditivos orgánicos, lo recomendado es un contenido a lo más del 0.2%.

Fuente: Kosmatka et al. (2004), Sanjuan y Chinchón (2014)

De otro lado, tanto Kosmatka et al. (2004) como Sanjuán y Chinchón (2014) mencionan otros tipos de cementos que son distintos al cemento Portland:

- Cementos de aluminatos monocálcicos, pueden endurecerse hidráulicamente y adquieren una resistencia importante.
- Cementos expansivos cuya composición se caracteriza por tener muchos sulfatos y aluminatos.
- Cementos de fraguado controlado, se busca que ocurra en un determinado periodo de tiempo.
- Cementos Ferrari, son cementos Portland con altas resistencias frente a la acción de los sulfatos y con módulos fundentes de 0,64.
- Cementos sobresulfatados, se obtiene por activación de escorias granulares del alto horno con sulfato cálcico permitiendo un contenido aproximado de trióxido de azufre entre 5-12% y un contenido de cal <5%.
- Cementos para pozos petroleros, los cuales tiene un proceso de producción y una especificación muy particular; debido a su uso como refuerzo en las paredes de los pozos, se requiere resistencias a la compresión mayor a 8 horas, curado de probetas a 38 y 60°C y ensayos especiales para determinar su fluidez y los tiempos de fraguado.
- Cementos repelentes al agua o impermeables, reducen la transmisión del agua por los capilares, pero no la de vapor de agua siendo de utilidad en morteros para fabricar baldosas, azulejos o revestimientos de estuco.

- Cementos de geopolímeros, también denominados zeolíticos o policialato. Su aplicación se remite a concretos de alta resistencia inicial y la estabilización de desechos.
- Cementos de etringita (sulfoaluminatos de calcio) que se usan, por ejemplo, para estabilización de desechos o para el fraguado rápido en minas de carbón.

Dependiendo del país y su normatividad, se presentan otros tipos de cementos que varían en su composición, propiedades y usos. Sin embargo, no se puede dejar de lado que para el diseño de las mezclas se debe calcular la cantidad de cada uno de los componentes que se usaran en el concreto en consideración de las propiedades que se desean obtener en el material tanto en su estado plástico como en su estado endurecido. Luego, los costos y la economía es un punto para tener presente.

5.2.5. *El concreto y sus propiedades*

Como se ha mencionado previamente, el concreto se caracteriza por tener dos estados claramente diferenciados. Uno de ellos es el estado plástico que se refiere a la mezcla fresca y homogénea de los componentes que permite manejarla, trabajarla y manipularla con facilidad sin requerir de mayores esfuerzos (Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto [IMCYC], 2004; Matallana, 2023). Por otra parte, está el estado endurecido que es aquel donde la mezcla ha perdido su fluidez y se convierte en una roca artificial desarrollando otras propiedades de gran importancia como la resistencia, la durabilidad, la densidad y la apariencia requeridas para su uso en estructuras y construcciones (IMCYC, 2004; Matallana, 2023). A continuación, se describen algunas de estas propiedades que son de especial interés:

- Resistencia

La resistencia es una propiedad que se refiere a la capacidad que tiene un concreto para soportar esfuerzos variables en su tipo y magnitud tales como esfuerzos mecánicos de compresión, tracción, flexión y abrasión, entre otros, sin alcanzar el fallo, (Gutiérrez, 2003; Falcon, 2022; Matallana, 2023). Justamente, es una de las propiedades más relevantes frente a los usos que tiene, siendo más resistente a los esfuerzos por compresión que ante esfuerzos como la tracción y el corte, razón por la cual, bajo algunas circunstancias se recurre a los refuerzos con acero (Gutiérrez, 2003; Cárdenas et al., 2022; Matallana, 2023).

La relación de agua/cemento, la porosidad, la resistencia de la pasta y de los agregados, y la adherencia pasta-agregados son determinantes en la resistencia de los concretos, luego, existen diferentes factores que indican en esta propiedad según Matallana (2023):

- Agregados: granulometría, texturas, formas, tamaños y composición.
- Cemento: tipo, composición, cantidad y calidad.
- Agua: cantidad y calidad.
- Aditivos: tipo, composición y calidad.
- Concreto: composición, edad, fraguado, permeabilidad, factores ambientales.

Para efectos de este trabajo, es relevante ahondar en las medidas de resistencia a la flexión de los concretos, la cual también se conoce como módulo de rotura (MR). Experimentalmente, el ensayo para la determinación del MR se realiza con base a normas estandarizadas como la NTC 2871 y NTC 1377, de acuerdo con las cuales se someten las

viguetas hechas de concreto a esfuerzos de flexión con una carga en el tercio medio (Matallana, 2023).

- Durabilidad

La durabilidad por su parte, hace alusión a la resistencia del concreto ante factores ambientales tales como la humedad, la temperatura, la erosión y la abrasión, aunque también se incluyen otros factores de naturaleza química (Falcon, 2022; Matallana, 2023). De acuerdo con este autor, la durabilidad puede ser incrementada en los concretos a través de la fabricación de mezclas con poca agua, el uso de aditivos, el uso de agentes complementarios con propiedades cementantes y el uso de cementos especiales, ya que permiten mejorar las propiedades del material y protegerlo frente al deterioro que generan dichos factores ambientales y/o químicos.

Falcon (2022) divide los factores que afectan la durabilidad en los concretos en factores mecánicos, físicos, químicos y biológicos (ver Tabla 5).

Tabla 5. Factores que afectan la durabilidad del concreto

Factores	Ejemplos
Mecánicos	Vibraciones, cargas, impactos o choques
Físicos	Fluctuaciones de temperatura, ciclos de hielo/deshielo, fuego
Químicos	Contaminación, humedad, aguas filtradas, agentes corrosivos
Biológicos	Vegetación o microorganismos

Fuente: Falcon (2022).

- Densidad o peso unitario

La densidad es una propiedad que da cuenta de la relación de masa por unidad de volumen en cualquier tipo de material. En el caso de los concretos, sirve para determinar el peso muerto de una estructura y su estabilidad ante condiciones ambientales tales como la temperatura y la humedad, (Gutiérrez, 2003; Cárdenas et al., 2022). Asimismo, existe una diferencia en la densidad del material en los dos estados, plástico y endurecido, debido a un cambio de volumen a razón del secado y el proceso de contracción, (Matallana, 2023). La mitigación de los cambios de volumen en el concreto puede ser abordada a través de la colocación de mallas de acero, la agregación de fibras de acero para reforzar, impermeabilizando las superficies de la estructura o fabricando mezclas con bajos contenidos de agua, (Matallana, 2023).

Desde este punto de vista, los concretos se pueden clasificar como livianos estructurales, concretos celulares, concretos de pesos normales y concretos con pesos pesados como se describe en la Tabla 6.

Tabla 6. Clasificación de los concretos con respecto a la densidad o peso volumétrico

Tipo	Descripción
Livianos estructurales	Densidad en el rango de 1.440 a 1.840 kg/m ³ . Se elaboran con agregados livianos como aquellos que son termo expandidos.
Celulares	Densidad en el rango de 400 a 700 kgf/m ³ . Se elaboran con pastas de cemento y espumas.
Normales	Densidad en el rango de 2.000 a 2.600 kgf/m ³ , aunque lo típico es que el peso unitario sea de 2.300 kgf/m ³ para el concreto sin reforzar, y de 2.400 kgf/m ³ para el concreto reforzado con acero.
Pesado	Su densidad es mayor a 2.600 kgf/m ³ . En su elaboración, se usan, por ejemplo, agregados pétreos muy densos o acero.

Fuente: Matallana (2023).

- Consistencia y trabajabilidad

La consistencia o trabajabilidad de un concreto es una medida que indirectamente da cuenta del grado de manejabilidad que tiene el material facilitando su mezclado, su transporte, su colocación, su compactación y su terminado conservando la homogeneidad, (Castillo, 2011; Falcon, 2022; Matallana, 2023). Así pues, este mismo autor presenta la siguiente clasificación relacionando la profundidad de la capa de agua al asentarse con la consistencia y la trabajabilidad (ver Tabla 7).

Tabla 7. Clasificación de los concretos a partir de su consistencia

Asentamiento en cm	Consistencia	Grado de trabajabilidad
< 2.0	Muy seca	Muy bajo
2.0 - 3.5	Seca	Bajo
3.5 – 5.0	Semiseca	Bajo
5.0 – 10.0	Media	Medio
10.0 - 15.0	Húmeda	Alto

Fuente: Matallana (2023).

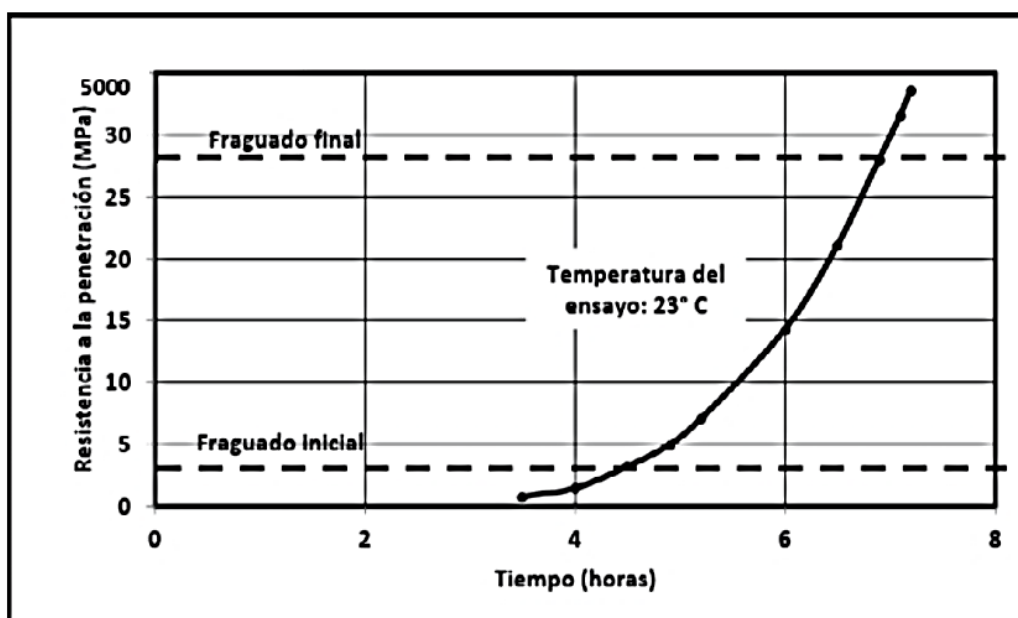
- Tiempo de fraguado

El fraguado para los concretos se refiere a ese primer paso en la solidificación del material que se encuentra inicialmente en estado plástico hacia su estado de rigidez o endurecimiento. En ese orden, es indispensable conocer cuál es el periodo de tiempo en el que ocurre el fraguado, puesto que para poder usar el concreto se requiere que éste se conserve en su estado plástico donde es manejable y trabajable, (Gutiérrez, 2003). Tal como

lo explica Castillo (2011) cuando el cemento entra en contacto con el agua, se inicia una reacción química y progresivamente el material va perdiendo plasticidad adquiriendo mayor rigidez, a su vez que se vuelve más difícil de manejar.

Por lo general, se establecen los tiempos inicial y final del fraguado, aunque son más bien arbitrarios, permiten diferenciar cuándo se puede trabajar con el concreto, transportarlo, moldearlo, compactarlo y terminarlo, y cuándo se ha iniciado el desarrollo de la resistencia mecánica y endurecimiento del material respectivamente, (Gutiérrez, 2003; Matallana, 2023). Existen diferentes métodos para la determinación de dichos tiempos, sin embargo, es común usar la NTC 890 donde los ensayos se basan en la resistencia del concreto ante esfuerzos de penetración, siendo de 3.5 MPa para el tiempo inicial y de 28 MPa para el tiempo final como se ilustra en la Figura 6.

Figura 6. Curva para determinar el tiempo de fraguado según la NTC 890, ejemplo



Fuente: Tomado de Matallana (2023).

Ahora bien, el tiempo de fraguado depende de diferentes factores tales como el tipo de cemento que se emplea en la mezcla, el contenido de agua, el uso de aditivos y otros factores ambientales como la temperatura, (Matallana, 2023). Es una variable que se puede acelerar o retrasar manteniendo la humedad de la mezcla o agregado aditivos retardantes o igualmente acelerantes dependiendo de las necesidades de quien lo va a usar, (Castillo, 2011).

- Permeabilidad

La permeabilidad es una propiedad que se refiere a la acción de dejar pasar un fluido por los poros de un material sin mayor control, luego, a medida que un material se impermeabiliza, se ejerce mayor control en la filtración a través de los poros no solo de agua sino de otros agentes que pueden ser nocivos para el material, (Falcon, 2022; Matallana, 2023). En el caso de los concretos, la impermeabilidad se incrementa a medida que se aumenta la cantidad de cemento y la relación agua/cemento disminuye de 0.50 (Falcon, 2022). La autora, con base de la NTC 4483 relaciona el coeficiente de permeabilidad con la profundidad de penetración para determinar la permeabilidad del concreto (ver Tabla 8).

Tabla 8. Permeabilidad de los concretos según la NTC 4483

Determinación	Unidad	Permeabilidad		
		Baja	Media	Alta
Coeficiente de permeabilidad	m/s	$<10^{-12}$	10^{-12} - 10^{-10}	$>10^{-10}$
Profundidad de la penetración	mm	<30	30-60	>60

Fuente: Falcon (2022), Matallana (2023).

5.2.6. Pavimentos rígidos

De manera general, los pavimentos son estructuras conformadas con capas diseñadas para fines de disipación de la energía que suponen las cargas de personas, vehículos u otros medios de transporte para que no sobrepase la capacidad del terreno natural del lugar, (Bonilla et al., 2017; Martínez, 2019). Estos mismos autores, se refieren a la estructura de los pavimentos y diferencian las distintas capas que la componen:

- **Capa subrasante:** es la capa más ancha de todas y se forma ya sea por el terreno natural o el material que se usa de relleno sirviendo de soporte estructural. Su profundidad es tal que en ella no influyen las cargas a las que se expone el pavimento. Luego, a partir de sus características de estabilidad, incompresibilidad y resistencia depende el espesor de las demás capas.
- **Capa subbase:** es una capa compuesta por un material pétreo que se localiza arriba de la capa subrasante y debajo de la base, la cual trabaja como una capa de drenaje y control frente a la ascensión capilar de agua. Asimismo, su finalidad está asociada a dar soporte, transmisión y distribución de cargas que se aplican sobre el pavimento.
- **Base:** es una capa ubicada en medio de la capa subbase y la capa de rodamiento, suele estar compuesta por materiales pétreos y sus funciones se relacionan con la reducción de los espesores de la carpeta, así como de los esfuerzos cortantes que se transmiten hacia las capas ubicadas en la parte inferior y el drenaje de agua atrapada.

- ***Carpeta o losa:*** es la capa superficial de rodamiento sobre la que transitan directamente vehículos o personas, su material es rígido y endurecido para reducir los esfuerzos y las cargas.

De acuerdo con Bonilla et al. (2017), los pavimentos se clasifican en ***pavimentos flexibles*** y ***pavimentos rígidos***. Los primeros son pavimentos compuestos por materiales pétreos o asfálticos y su configuración por capas se caracteriza porque mejoran en cuanto a calidad de abajo hacia arriba; son usados como alternativa en lugares con tránsito de 10 a 50 mil vehículos por día. De otro lado, los pavimentos rígidos son aquellos que están compuestos por una losa sencilla de concreto hidráulico en la superficie, seguido de una capa subbase y una capa subrasante; es una alternativa para lugares con rangos de 5 a 50 mil vehículos por día.

Realizando una comparación entre ambos tipos de pavimentos, se destaca que en los pavimentos rígidos, la losa de concreto gracias a sus propiedades, es la que asume la mayor parte de la carga y su distribución es prácticamente uniforme disminuyendo la tensión en las capas inferiores, contrario a lo que sucede con los pavimentos flexibles donde la rigidez es menor siendo más susceptible a la deformación frente a las cargas y tensiones que se deben soportar, (Bonilla et al., 2017; Martínez, 2019).

Siguiendo a Arroyo (2010), el diseño de un pavimento rígido supone evaluar una serie de variables que son determinantes:

- **Espesor:** es la variable dependiente que se pretende establecer para el diseño del pavimento y sirve para realizar cálculos de los ejes equivalentes, entre otros factores de diseño.
- **Serviciabilidad:** se refiere a la habilidad que tiene un pavimento para servir al un determinado tipo de tráfico y pese a que su medición es subjetiva, se usa un índice de servicio definido entre 0 (intransitable) y 5 (excelente), donde un mayor índice implica una mayor vida útil.
- **Tránsito:** es una variable muy relevante pero también una de las que mayor incertidumbre tiene asociada, considera el tráfico, el número de ciclos de carga y descarga, el número de carriles, un factor de crecimiento del tráfico y la vida útil del pavimento.
- **Transferencia de carga:** se refiere a la capacidad que tiene la losa del pavimento frente a la transmisión de los esfuerzos cortantes a otras losas adyacentes, lo ideal es minimizar los esfuerzos y la deformación del pavimento. Depende de factores como la cantidad de tráfico, el soporte lateral de las losas, el uso de pasa juntas, el tipo de pavimento y el tipo de bordes que tenga.
- **Propiedades del concreto:** son fundamentales la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad de este material debido a que compone la losa superficial influyendo en su comportamiento y en su vida útil.
- **Resistencia del subrasante:** se mide a través del módulo de reacción del suelo, el cual se refiere a la capacidad que tiene el terreno natural del lugar para soportar el pavimento y la carga.

- ***Drenaje:*** es un factor muy relevante para establecer el comportamiento de la estructura del pavimento; se mide con base al coeficiente de drenaje que depende de la calidad del drenaje y la exposición a la saturación.
- ***Confiabilidad:*** es una medida probabilística para hacer referencia al comportamiento satisfactorio de un pavimento a lo largo de su vida útil, o en su defecto, la probabilidad de que se presente deformación y resistencias debajo de los límites permisibles.

Miranda (2010) refiere a los daños que pueden presentar los pavimentos rígidos clasificándolos en cuatro (4) categorías diferentes, como se expone en la Tabla 9.

Tabla 9. Posibles daños que pueden presentar los pavimentos rígidos

Categoría	Daños
Juntas	- Deficiencias en el sellado del pavimento que posibiliten acumulación de material incompresible o infiltraciones. - Las juntas saltadas por roturas, fracturas o desintegración de los bordes. - Separación o aberturas de la junta longitudinal del pavimento.
Fisuras y grietas	- Grietas o fisuras en esquinas, juntas o bordes que delimitan las losas. - Grietas o fracturas longitudinales de las losas en paralelo a los ejes de las carreteras. - Grietas o fracturas transversales en las losas que ocurren perpendicularmente al eje de las carreteras.
Deterioros superficiales	- Fisuramientos por retracción o roturas de superficie debido al desprendimiento de pequeños trozos de concreto. - Desintegración de la superficie del pavimento por la pérdida de material fino que se desprende del concreto. - Aparición de baches a causa de la descomposición o desintegración del concreto y remoción de material generando cavidades irregulares en el pavimento.
Otros	- Levantamientos o elevaciones abruptas de la superficie de los pavimentos. - Escalonamiento y desnivel de las losas contiguas. - Desnivel en la superficie de las losas del pavimento respecto a las bermas. - Incremento en la separación entre las bermas y el pavimento de manera longitudinal. - Parches deteriorados y con nuevas fallas. - Surgencia de material fino a través de las juntas o fisuras en el pavimento. - Fracturas y fisuras múltiple en diferentes sentidos.

Fuente: Miranda (2010).

Cabe señalar que muchas de estos daños y deterioros en los pavimentos son causados por la fatiga o falla de los materiales que los conforman, como el caso del concreto en pavimentos rígidos.

5.2.6.1. Propiedades del concreto para el diseño de pavimentos rígidos

Para efectos de diseño en pavimentos rígidos, las propiedades del concreto hidráulico que mayor relevancia cobran son el módulo de rotura (MR) o resistencia a la flexión, y el módulo de elasticidad.

El MR controla los agrietamientos por fatiga o falla del pavimento a razón de las cargas repetitivas a las que se ve expuesto, (Morales, 2005). La medida se obtiene a través del ensayo de carga en los tercios de las viguetas de concreto después de 28 días, específicamente, se obtiene una zona sometida a un momento flector constante en el tercio medio PL/3 produciéndose una rotura de en cualquier punto de ésta misma zona (Morales, 2005). Las ecuaciones que pueden usarse para estimar cuantitativamente el MR (S'_c) son:

$$S'_c = k(f'_c)^{\frac{1}{2}} \quad \textbf{Ecuación 1}$$

Donde k toma valores entre 7 y 12, y f'_c se refiere a la resistencia a la compresión del material en unidades de PSI.

$$S'_c = 210 + 1.02 IT \quad \textbf{Ecuación 2}$$

Donde el MR se estima a partir de la tracción indirecta que se mide en las probetas en unidades de PSI (IT).

De acuerdo con Morales (2005), los valores del MR oscilan con frecuencia entre 2.80 y 4.80 MPa, aunque puede alcanzar valores cercanos a 8.20 MPa cuando son concretos de alta resistencia.

Por otra parte, el módulo de elasticidad en el concreto da cuenta tanto de la rigidez como de la capacidad que tendrá la losa del pavimento para distribuir uniformemente las cargas a las que se expone (Morales, 2005). Este parámetro relaciona la tensión y la deformación del material considerando deflexiones, curvaturas y tensiones en éste (Morales, 2005). La ecuación que se usa para su cálculo en unidades de PSI, es:

$$E_c = 57000(f'_c)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 3}$$

5.3. Marco normativo

En lo que respecta al marco normativo que rige este trabajo de investigación, primero, se identifican las siguientes normas y especificaciones emitidas por el INVIAS (2012):

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

Describe el método de ensayo que se debe usar para la determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños tanto de los agregados gruesos como de los agregados finos, es decir, la granulometría de un material, usando el tamizaje.

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

Se describe el procedimiento para poder determinar la cantidad de material que pasa el tamiza de 75 µm o No. 200, tales como limos, arcillas, polvos y otros agregados solubles

en agua. 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.

Se describe el método de ensayo 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 combinan acciones de abrasión, impacto y molienda sobre el material. La degradación se reporta como un porcentaje de pérdida de masa después de tamizar.

- INV E-219-13 Resistencia a la degradación de los agregados gruesos de tamaños mayores a 19 mm (3/4”) por abrasión e impacto en la Máquina de Los Ángeles.

Se describe el método de ensayo para la determinación de la resistencia a la degradación de aquellos agregados gruesos con tamaños mayores a 19 mm (3/4”) mediante el uso de la Máquina Los Ángeles donde se combinan acciones de abrasión, impacto y molienda sobre el material. La degradación se reporta como un porcentaje de pérdida de masa después de tamizar.

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

Se describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de la densidad, la densidad relativa y la absorción de agua del agregado fino. Los valores que se determinan

son promedios que se calculan para la una cantidad de partículas de agregado dada sin incluir los vacíos entre ellas (fracción sólida).

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

De manera similar, se describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de la densidad, la densidad relativa y la absorción de agua, pero en este caso, para el agregado grueso. Los valores que se determinan son promedios que se calculan para la una cantidad de partículas de agregado dada sin incluir los vacíos entre ellas (fracción sólida).

- INV E-224-13 Determinación del valor del 10% de finos.

Su objetivo es describir el procedimiento que se emplea para la evaluación de la resistencia mecánica de agregados gruesos ante el aplastamiento por esfuerzos de compresión y para ello se determina la carga necesaria para producir un 10% de finos, es decir, la pérdida de agregados fragmentados que pasan por tamiz de 2.36 mm o No. 8.

- INV E-227-13 Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso.

Se describe el procedimiento que se emplea para determinar el porcentaje de partículas de un agregado grueso, ya sea por conteo o en masa, bajo el criterio de un número específico de caras fracturadas (superficies angulosas o quebradas). Se suele usar para maximizar la resistencia de los agregados al corte y adoptar medidas para aumentar la estabilidad ante fricción para usos en capas de rodadura.

- INV E-230-13 Índices de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras.

Se refiere al procedimiento que se debe emplear para la determinación de los índices de aplanamiento y alargamientos para agregados naturales o artificiales que se pretenden usar en la construcción de carreteras. El índice de aplanamiento solo es aplicable para el rango de tamaño de partículas entre 6.3 mm (1/4") y 63 mm (2 1/2"), y el índice de alargamiento solo aplica para el rango de 6.3 mm (1/4") a 50 mm (2").

- INV E-406-13 Contenido de aire en el concreto fresco por el método de presión.

Describe el procedimiento para la determinación del contenido de aire en concreto en estado fresco mediante el método de presión, es decir, por seguimiento en los cambios de volumen observables a medida que se ejerce presión sobre el material. Dicho método se recomienda para concretos o morteros que han sido fabricados con agregados relativamente densos para poder aplicar los factores de corrección respectivos. Luego, no se debe usar para agregados muy porosos, escoria de alto horno enfriadas con aire y concretos donde se usaron agregados livianos.

- INV E-414-13 Resistencia a la flexión del concreto.

Se trata del método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión, reportado como módulo de rotura, de un espécimen previamente preparado y curado. Consiste en usar una viga apoyada y cargada en los tres tercios de la luz libre. Es de gran utilidad para el diseño, la dosificación, la mezcla y la colocación de concreto, en especial, cuando se pretende construir pavimentos rígidos.

Otros referentes normativos que cabe considerar son la Resolución 472 de 2017 mediante la cual el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible reglamentó 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.

6. Metodología

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

6.1. Tipo de investigación

Para efectos de este trabajo, se seleccionó un tipo de investigación aplicada. Tal como lo explica, Esteban (2018), este tipo de investigación se enfoca en la resolución de problemas que se presentan en la vida cotidiana, por ejemplo, en procesos productivos y logísticos, o a nivel tecnológico que ocurren en diferentes esferas de la sociedad. Su objetivo con frecuencia, se remite al mejoramiento, el perfeccionamiento o la optimización del algún sistema, objeto, equipo, máquina, proceso o procedimiento a la luz de la ciencia, la tecnología y el conocimiento ingenieril, (Esteban, 2018).

La investigación aplicada, como su nombre lo sugiere, es un tipo de investigación que acude a la práctica y la experiencia mediadas por el conocimiento teórico adquirido, la cual, metodológicamente se fundamenta en las distinciones entre saber y hacer, conocer y practicar, o explicar y aplicar para buscar soluciones a problemas de la vida cotidiana o intervenir de manera efectiva de tal manera que se generen beneficios para todos los actores involucrados, (Vargas, 2009).

En ese sentido, con la incorporación de la escoria siderúrgica proveniente de la ruta del horno de arco eléctrico en la fabricación concreto hidráulico y el análisis de sus propiedades mecánicas frente al concreto convencional representa una aproximación a una posible alternativa de solución para el aprovechamiento de este producto residual, el cual, por lo general se desecha causando impactos ambientales.

Ahora bien, desde la perspectiva de, Castellanos y Carreño (2013), la investigación aplicada es de gran importancia para consolidar la formación de profesionales en ingeniería integrales debido a que facilita su participación activa y representa una oportunidad para afianzar el conocimiento teórico a través de la práctica y la experimentación, a su vez que les permite desarrollar competencias esenciales de trabajo en el laboratorio e investigación que se requieren para desempeñarse en el mundo laboral.

6.2. Materiales, equipos, procedimientos y ensayos de análisis

A continuación, se describen los materiales, equipos e instrumentos, así como los procedimientos y ensayos de análisis que fueron empleados para la caracterización de los agregados y las mezclas de concreto de acuerdo con los objetivos que orientaron la investigación.

6.2.1. *Materiales*

Los materiales principales para la preparación de las mezclas de concreto experimentales son: la escoria negra de horno de arco eléctrico, los agregados pétreos, el cemento tipo Portland (marca Argos, estructural Max) y agua destilada.

6.2.2. *Equipos e instrumentos*

En lo que se refiere a equipos se requirieron:

- Horno y placa calefactora.
- Recipientes: latas tipo branquias, vaso precipitado y cacerolas para calentar asfalto.
- Dispositivo para moldear probetas.

- Extractor de probetas.
- Máquina de compresión.
- Otros equipos y accesorios.

6.2.3. *Procedimientos y ensayos*

La Tabla 10, relaciona los procedimientos y ensayos que se implementaron para el estudio de los agregados de escoria y las mezclas de concreto -convencional y con escoria. En cada una de las normas, se describe en detalle los requerimientos de materiales y equipo, así como las operaciones a realizar, los cálculos y demás especificaciones o consideraciones que se deben tener presente a la hora de aplicarlos.

Tabla 10. 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-214-13	Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz No. 200 en los agregados pétreos mediante lavado.
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 de agregados finos
INV E-223-13	Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso
INV E-224-13	Determinación del valor del 10% de finos.
INV E-227-13	Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso.
INV E-230-13	Índices de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras.
INV E-238-13	Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato micro-deval
INV E-414-13	Resistencia a la flexión del concreto.

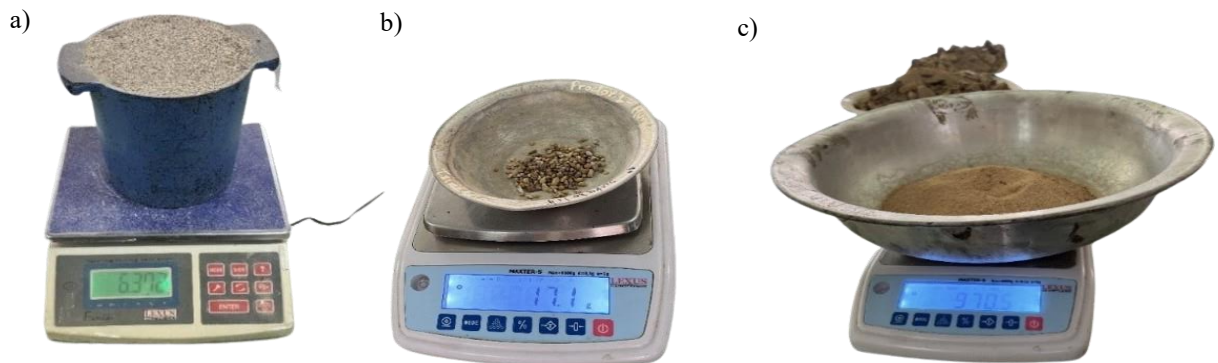
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describe brevemente cada uno de los ensayos que fueron realizados para efectos de ésta investigación. Para mayor detalle, se recomienda remitirse a cada una de las normas referidas en la Tabla 10.

6.2.3.1. Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos

Este ensayo se hizo bajo la norma INV E-213-13, para ello, se tomó una masa seca de muestra de agregados conocida, la cual se hizo pasar por una serie de tamices de diferentes tamaños con el propósito de determinar la distribución del material en función del tamaño de sus partículas. En este caso, se realizó con la arena de río y la escoria negra. La Figura 7a es la muestra de arena de río, la cual fue tamizada dejando diferentes fracciones de tamaños de partícula, mostrando ejemplos en la Figura 7b y Figura 7c.

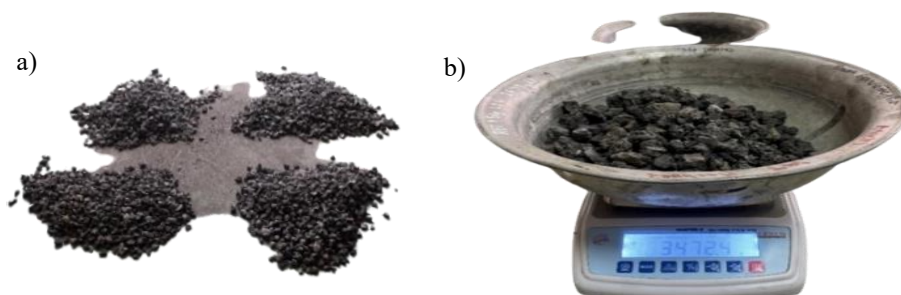
Figura 7. Granulometría de la arena



Fuente: Autoría propia.

De manera similar, la Figura 8a muestra el cuarteo que se realizó para la escoria negra y la Figura 8b muestra el pesaje de una de las fracciones resultantes de la granulometría.

Figura 8. Granulometría de la escoria negra



Fuente: Autoría propia.

6.2.3.2.Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz No. 200 en los agregados pétreos mediante lavado

El ensayo, basado en la norma INV E-214-13, comprendió un tamizaje húmedo donde una muestra de agregado con masa conocida se lavó con agua destilada, y una vez decantada, se pasó por el tamiz de 75um o No. 200. Su importancia radica en la posibilidad de separar del agregado el material con tamaños de partícula más finos tales como limos, arcillas y polvos, entre otros, que son solubles en el agua.

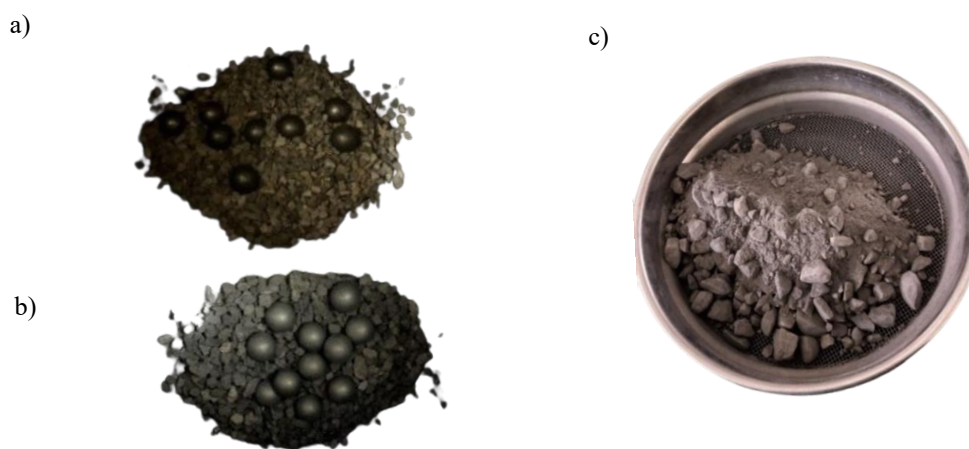
6.2.3.3.Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½ ") por medio de la Máquina Los Ángeles

Siguiendo la norma INV E-218-13, en el tambor de la Máquina Los Ángeles se dispuso la muestra de agregado y la carga abrasiva, es decir, las esferas metálicas. Luego, se hizo girar el tambor a una velocidad entre 30-33 rpm hasta completar 500 revoluciones, y una vez se cumplieron, se descargó el material del tambor para proceder con la separación del material a través de un tamiz No. 12 (1.17 mm). Bajo este ensayo, se determina la

degradación de los agregados de tamaños menores a 37.5 mm ($1\frac{1}{2}$ ”) frente a las acciones combinadas de abrasión, impacto y molienda, midiendo la pérdida de masa en porcentaje.

En ese orden, el ensayo se realizó tanto para el triturado pétreo $\frac{3}{4}$ ” (Figura 9a) como para la escoria negra (Figura 9b) en su papel como agregados gruesos en las mezclas de concreto, usando 11 esferas dada la granulometría tipo B de los materiales como se indica en la norma. La Figura 9c, además, deja en evidencia el producto de degradación para la muestra de escoria.

Figura 9. Degradación de agregados gruesos con la Máquina Los Ángeles



Fuente: Autoría propia.

6.2.3.4. *Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino*

De acuerdo con la norma INV E-222-13, inicialmente, se sumergió en agua la muestra del agregado fino, es decir, la arena, durante un periodo de 24 hrs. aproximadamente. Luego de transcurrido este tiempo, se retiró el agua y se secó superficialmente el material para determinar su masa (con los poros llenos). Después, se determinó el volumen de la muestra

del agregado usando el método de desplazamiento de agua en un recipiente graduado. Por último, se secó la muestra en un horno ($\sim 110^{\circ}\text{C}$ por 3 hrs.) y se midió la masa seca. Con los datos recolectados, se calculó la densidad, la densidad relativa y la absorción de agua (Ver Figura 10).

Figura 10. Muestra de arena sumergida en agua para la determinación de la densidad, la densidad aparente y la absorción



Fuente: Autoría propia.

Las fórmulas para realizar los cálculos se presentan explícitamente en la norma correspondiente, (INV E-222-13).

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

Para este ensayo, se recurrió a la norma INV E-223-13. Así pues, en primer lugar, se sumergió la muestra del agregado grueso durante un periodo de 24 hrs. aproximadamente. Luego de transcurrido este tiempo, se retiró el agua y se secó superficialmente el material para determinar su masa (con los poros llenos). Después, se determinó el volumen de la muestra del agregado usando el método de desplazamiento de agua en un recipiente. Por

último, se secó la muestra en un horno ($\sim 110^{\circ}\text{C}$ por 3 hrs.) y se midió la masa seca. Con los datos recolectados, se calculó la densidad, la densidad relativa y la absorción de agua.

Ahora, como se trataba de los agregados gruesos, estos procedimientos se realizaron tanto para el triturado $\frac{3}{4}$ " como para la escoria negra (Ver Figura 11).

Figura 11. Muestra de escoria negra sumergida en agua para la determinación de la densidad, la densidad aparente y la absorción



Fuente: Autoría propia.

Las fórmulas para realizar los cálculos se presentan explícitamente en la norma (INV E-223-13).

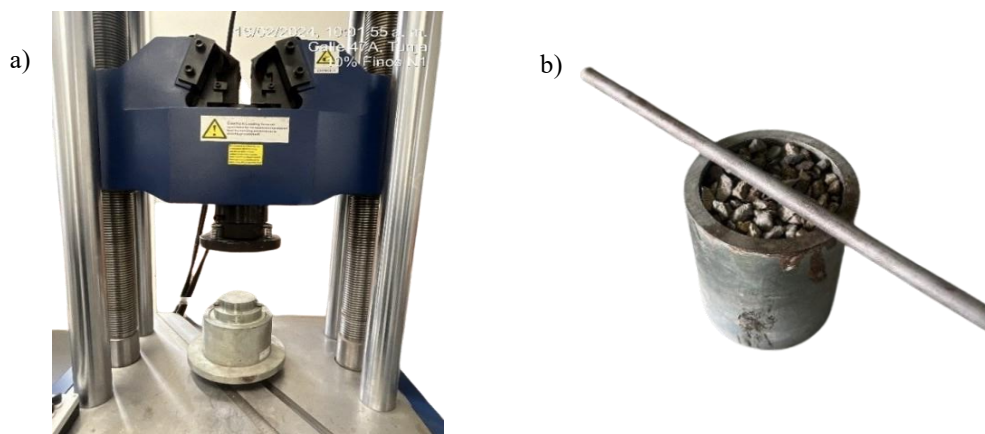
6.2.3.6. Determinación del valor del 10% de finos

De acuerdo con el procedimiento descrito en la norma INV E-224-13, la muestra de agregados, el triturado de $\frac{3}{4}$ ", se secó al aire libre, y luego, se tamizó para obtener el material cuyos tamaños de partícula estaban comprendidos entre 12.7 y 9.5 mm ($\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{8}$ "). El material se dividió en dos partes de tal manera que se alcanzara una altura aproximada de 100 mm en el cilindro del ensayo. Cada muestra se compactó en el cilindro dándole 25 golpes con una varilla y una altura de caída estimada de 25 mm.

Una primera porción se destinó para el ensayo en seco, por lo cual, se sometió a un secado en horno ($\sim 110^{\circ}\text{C}$ por 3 hrs.), se dejó enfriar hasta temperatura ambiente y se midió su masa inicial seca. Luego, se puso el pistón sobre el cilindro con la muestra compacta y se sometió gradualmente a esfuerzos de compresión variando la carga hasta que el material fragmentado que pasaba por un tamiz No. 8, alcanzó una porción del 10% de finos.

Para el análisis de la muestra saturada, en vez de someterla a secado en el horno, se sumergió en un recipiente con agua dejando una lamita de 50 mm por encima de ésta y se dejó por un periodo aproximado de 24 hrs. Cuando la muestra se sumerge, se dejó caer 25 veces desde una distancia estimada de 25 mm por encima del fondo para eliminar el aire atrapado. Una vez transcurrido el periodo de saturación, se realizó el mismo proceso de compresión hasta obtener el 10% de finos. La Figura 12 permite la visualización del equipo con el pistón que se empleó para someter a diferentes cargas las muestras de análisis (Figura 12a), así como del cilindro con la muestra de agregado y la varilla que se usó para compactación (Figura 12b).

Figura 12. Ensayo de producción de 10% de finos para el triturado $\frac{3}{4}$ ''



Fuente: Autoría propia.

6.2.3.7. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso

Con base a la norma INV E-227-13, la muestra del agregado grueso, el triturado $\frac{3}{4}$ ", se preparó de acuerdo con las instrucciones seleccionando un tamiz No. 4. Posteriormente, la muestra se lavó sobre dicho tamiz para remover materiales finos, y luego, se secó hasta una masa constante tomando registro de ésta. En seguida, se esparció el material sobre una superficie y por inspección, se determinó por conteo la cantidad de partículas con caras fracturadas y no fracturadas, cuyas masas se midieron para calcular la proporción con respecto a la masa total de la muestra. La Figura 13, evidencia la toma de peso y clasificación del agregado grueso, específicamente, la figura 13a y figura 13b evidencian la muestra con y sin fracturas respectivamente.

Figura 13. Caras con y sin fracturas en el agregado grueso



Fuente: Autoría propia.

6.2.3.8. Índices de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras

Para este ensayo se siguió la norma INV E-230-13. La determinación del índice de aplanamiento se basó en dos operaciones. Primero, el fraccionamiento de la muestra del agregado usando tamices de diferentes tamaños de partícula, y segundo, cribando cada una de las fracciones con un tamiz de barras paralelas (Ver Figura 14).

Figura 14. Determinación del índice de aplanamiento de una muestra de agregado, triturado



Fuente: Autoría propia.

De manera similar, la determinación del índice de alargamiento constó también de dos operaciones. La primera, referida a la división de la muestra de agregado usando tamices de diferentes tamaños de partícula, y luego, analizando cada fracción con un calibrador de longitudes. Las Figuras 15a y 15b permiten observar la división de varias fracciones de agregado grueso y escoria negra según el diámetro de las partículas, y el uso del calibrador de longitudes.

Figura 15. Determinación del índice de alargamiento de una muestra de agregado, escoria



Fuente: Autoría propia.

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

A partir del procedimiento descrito en la norma INV E-238-13, una muestra de agregado grueso con granulometría normalizada previamente, se sumergió en agua por un periodo de 1 hr. aproximadamente. Posteriormente, se agregó a un recipiente de acero para llevar a cabo el ensayo junto con 2 litros de agua y 5000 g de esferas de acero como carga de abrasión. Dicho recipiente se puso a rotar a 100 rpm por un periodo de tiempo de 2 hrs., y al terminar, se lavó y se secó la muestra. Este ensayo, se realizó para la escoria (Ver Figura 16) y el triturado $\frac{3}{4}$ ". Las Figuras 16a y 16b muestran la extracción de las esferas metálicas, y la Figura 16c hace alusión al pesaje inicial de la masa requerida de esferas para el ensayo.

Ahora, la resistencia del agregado se midió con base a la pérdida de material usando un tamiz No. 16, expresada como proporción de la masa seca de la muestra total.

Figura 16. Ensayo con micro-deval para determinar la resistencia de la escoria



Fuente: Autoría propia.

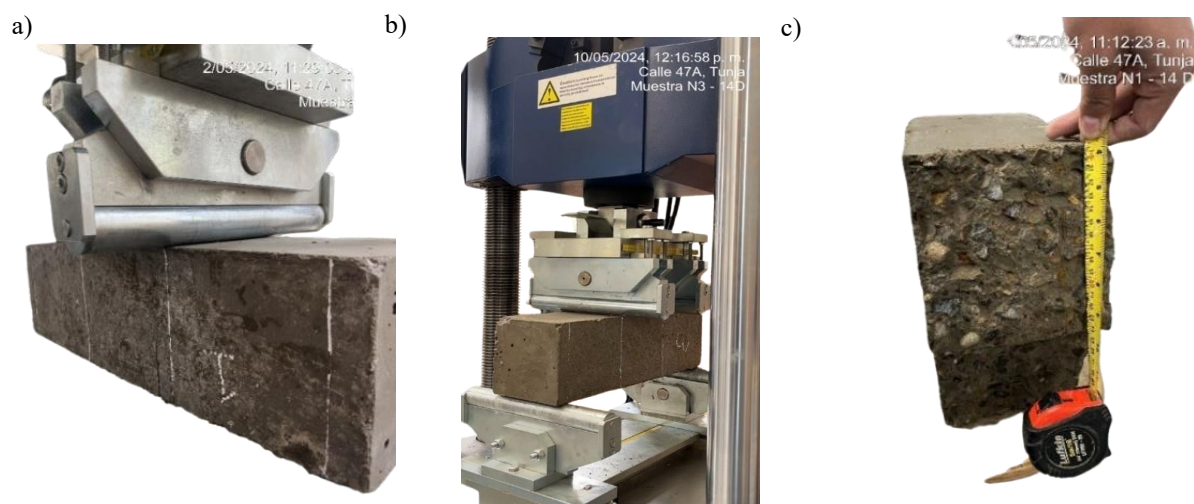
6.2.3.10. Resistencia a la flexión del concreto

Finalmente, la determinación de la resistencia a la flexión se realizó mediante el ensayo de una viga simple apoyada y cargada en los tercios de la luz libre como se describe en la norma INV E-414-13. Los especímenes fueron las vigas de concreto que se produjeron con y sin escoria en diferentes proporciones según la planificación experimental. Aquí, también se consideraron diferentes tiempos de curado.

En cuanto al procedimiento, cada viga se volteó sobre un lado con relación a su posición de moldeado y se centró en los bloques de apoyo (y el punto de aplicación de la fuerza). Los bloques de aplicación de apoyaron sobre el espécimen en los puntos tercios, y luego, se aplicó la carga a una velocidad constante hasta la falla del material. Después del ensayo, se procedió a tomar medidas con respecto a la línea de falla para realizar los cálculos correspondientes.

La Figura 17 consta de un registro fotográfico, a modo de ejemplo, permite observar la ubicación de las viguetas y la división en tercios (Figura 17a), la aplicación de la carga en los dos tercios (Figura 17b) y las fallas en el material al terminar el ensayo (Figura 17c).

Figura 17. Determinación de la resistencia a la flexión en las viguetas de concreto



Fuente: Autoría propia.

6.3. Fases de la investigación

La investigación se llevó a cabo en 4 fases, las cuales se describen a continuación siguiendo a, Monje (2011).

6.3.1. Fase conceptual

Esta fase comprende el primer momento de la investigación donde se ordena y se sistematizan las preguntas, las inquietudes y los conocimientos preliminares en torno a un tema de interés, en este caso, el uso y propiedades de la escoria del horno de arco eléctrico en la fabricación de concretos hidráulicos, constituyendo el punto de partida para:

- i. Formular y delimitar el problema de investigación.
- ii. Realizar una revisión bibliográfica para establecer el estado del arte, antecedentes y la fundamentación teórico-conceptual.

- iii. Construcción del marco de referencia para contextualizar el problema de investigación desde los antecedentes, el marco teórico, el marco conceptual y el marco normativo de requerirse.

6.3.2. Fase de planeación y diseño

La fase de planeación y diseño se remite a la toma de decisiones que realizó el investigador sobre la metodología que se implementó para aproximarse al problema de investigación y dar respuesta a los objetivos planteados. Lo anterior, incluyó la determinación de las necesidades de materiales, equipos e instrumentos, el establecimiento de los procedimientos y ensayos necesarios para caracterizar los agregados y las mezclas de concreto experimentales, y la determinación del diseño de éstas mismas considerando las variaciones composicionales. En esa medida, la Tabla 11 relaciona los ensayos que se realizaran para agregados gruesos, finos y para la escoria negra.

Tabla 11. Planeación de ensayos para los agregados

Ensayo	Agregados		
	Grueso	Fino	Escoria negra
Resistencia mecánica	1		1
Ensayo de solidez	1		1
Partículas livianas	1	1	1
Caras fracturadas	1		1
Alargamiento	1	1	1
Ablandamiento	1	1	1
Granulometría	1	1	1
Paso tamiz No. 200		1	
Color permisible		1	
Contenido de sulfatos		1	
Total	7	7	7

Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, se formularon 5 mezclas de concreto experimentales diferentes (N1-N5) cuya variable fue el porcentaje de escoria de reemplazo para agregados gruesos (3/4"); cada una se realizó por triplicado: probeta 1 (P1), probeta 2 (P2) y probeta 3 (P3). El concreto con 0% es la mezcla convencional de referencia, y los porcentajes de escoria considerados en las demás mezclas fueron de 5%, 25%, 50% y 75%. Como se observa en la Tabla 12, para cada muestra se planeó ensayo de granulometría, resistencia de flexión y contenido de aire.

Tabla 12. Diseño de mezclas y planificación de ensayos para cada muestra

Concreto	Probeta	Granulometría	Resistencia a la flexión	Contenido de aire
N1 (0% escoria)	P1	1	1	1
	P2	1	1	1
	P3	1	1	1
N2 (5% escoria)	P1	1	1	1
	P2	1	1	1
	P3	1	1	1
N3 (25% escoria)	P1	1	1	1
	P2	1	1	1
	P3	1	1	1
N4 (50% escoria)	P1	1	1	1
	P2	1	1	1
	P3	1	1	1
N5 (75% escoria)	P1	1	1	1
	P2	1	1	1
	P3	1	1	1
Total por ensayo		15	15	15
Total de ensayos			45	

Fuente: Elaboración propia.

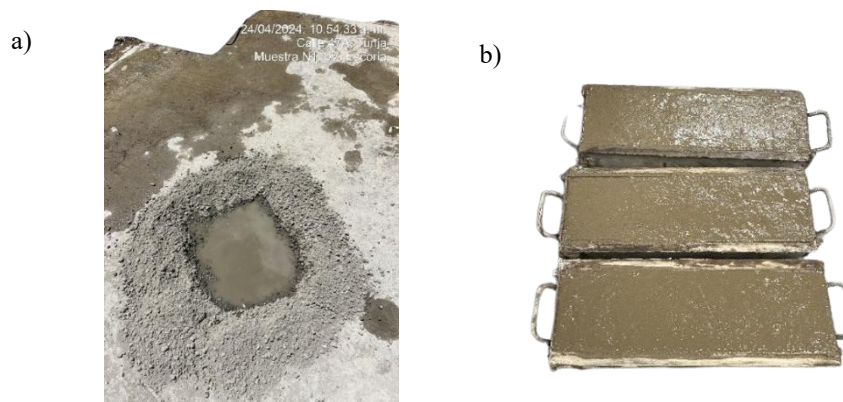
6.3.3. Fase empírica

La fase empírica es la fase de ejecución, en la cual, se procedió a realizar todas las actividades, procedimientos y ensayos planificados con el fin de recolectar datos y prepararlos para su posterior análisis. En este caso, se realizaron los ensayos de laboratorios y se obtuvo información sobre las propiedades tanto de los agregados como de las mezclas

de concreto experimentales sujetas de estudio. Asimismo, en esta fase se realizaron todos los cálculos pertinentes y se consolidó la información en una matriz de Excel.

La Figura 18, se deja evidencia sobre el proceso de preparación de las mezclas de concreto (Figura 18a) y las viguetas frescas (Figura 18b) para los ensayos de resistencia, en este caso, para la muestra N1 con 0% de escoria, es decir, el concreto convencional.

Figura 18. Preparación de la mezcla de concreto convencional (0% escoria) y las viguetas para los ensayos



Fuente: Autoría propia.

6.3.4. Fase analítica

En esta fase se procedió a describir y analizar los resultados obtenidos y consolidados en la fase anterior con el propósito de dar respuesta a la pregunta de investigación, así como a los objetivos proyectados. Para ello, se hizo necesario ordenar la información en tablas más específicas y gráficas para resumir los resultados más relevantes, e igualmente, se identificaron tendencias en las propiedades mecánicas de los agregados y las mezclas de concreto.

Con la descripción de resultados y los respectivos análisis se terminó de documentar de manera escrita, agregando conclusiones y recomendaciones para futuros estudios.

7. Resultados

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos a partir del trabajo experimental desarrollado en torno a la adición de escoria negra a las mezclas de concreto hidráulico como reemplazo de los agregados gruesos en diferentes proporciones y el impacto en sus propiedades en comparación con el concreto convencional. En general, se fabricaron un total de 15 viguetas para el ensayo de laboratorio de resistencia a flexión, las cuales fueron divididas de grupo de 3 muestras según el porcentaje de reemplazo con escoria negra puestas al curado de 7, 14 y 28 días, respectivamente (ver Tabla 13). Cabe señalar, que las muestras con 0% de escoria corresponden al concreto convencional (100% de agregados gruesos).

Tabla 13. Seguimiento de las muestras y los ensayos

Porcentaje de escoria (%)	Fecha Inicio	Fecha Ensayo	Edad Muestra (Días)
0%	25/04/2024	02/05/2024	7
		09/05/2024	14
		23/05/2024	28
5%	25/04/2024	02/05/2024	7
		09/05/2024	14
		23/05/2024	28
25%	26/04/2024	03/05/2024	7
		10/05/2024	14
		24/05/2024	28
50%	02/05/2024	09/05/2024	7
		16/05/2024	14
		30/05/2024	28
75%	02/05/2024	09/05/2024	7
		16/05/2024	14
		30/05/2024	28

Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, la Tabla 14 presenta los parámetros que se adoptaron como base para el diseño de las mezclas de concreto considerando su aplicación en pavimentos rígidos donde se requiere especial resistencia a la flexión según la norma IDU ET 2011.

Tabla 14. Parámetros de diseño de las mezclas de concreto

Parámetros	Valor	Unidades
Asentamiento	2 – 4	Pulgadas
Tamaño máximo nominal	$\frac{3}{4}$ " (19.0)	pulgadas (mm)
Forma del agregado	Angular	
Cantidad de agua de mezclado	210	L/m ³ de concreto
Resistencia requerida (f'c)	240-260	Kg/cm ²
Resistencia de diseño (f'cr)	300	Kg/cm ²
Relación agua/cemento	0,45	
Cantidad de cemento	464	Kg/m ³ de concreto
Criterio ACI (K)	2	
Módulo de rotura (MR)	3.0	MPa

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con, CEMEX Colombia (2020), dichos parámetros de diseño para pavimentos son los que permiten obtener una menor deformación de las capas de rodadura en las zonas de arranque y frenado por donde transitan los vehículos, además, aumentan la resistencia a derrames de combustibles y aceites, reduce la reflectancia y disminuye los costos de mantenimiento.

En cuanto a la relación agua/cemento, se trabajó con un valor intermedio comúnmente usado en otras investigaciones con buenos resultados, en tanto se entiende que un exceso de agua, si bien aumenta la fluidez, la trabajabilidad y la plasticidad en el estado fresco de la mezcla de concreto, también implica una disminución de su resistencia a medida que transcurre el tiempo y se endurece debido a los espacios que ocupa el agua libre, (Guevara et al., 2011).

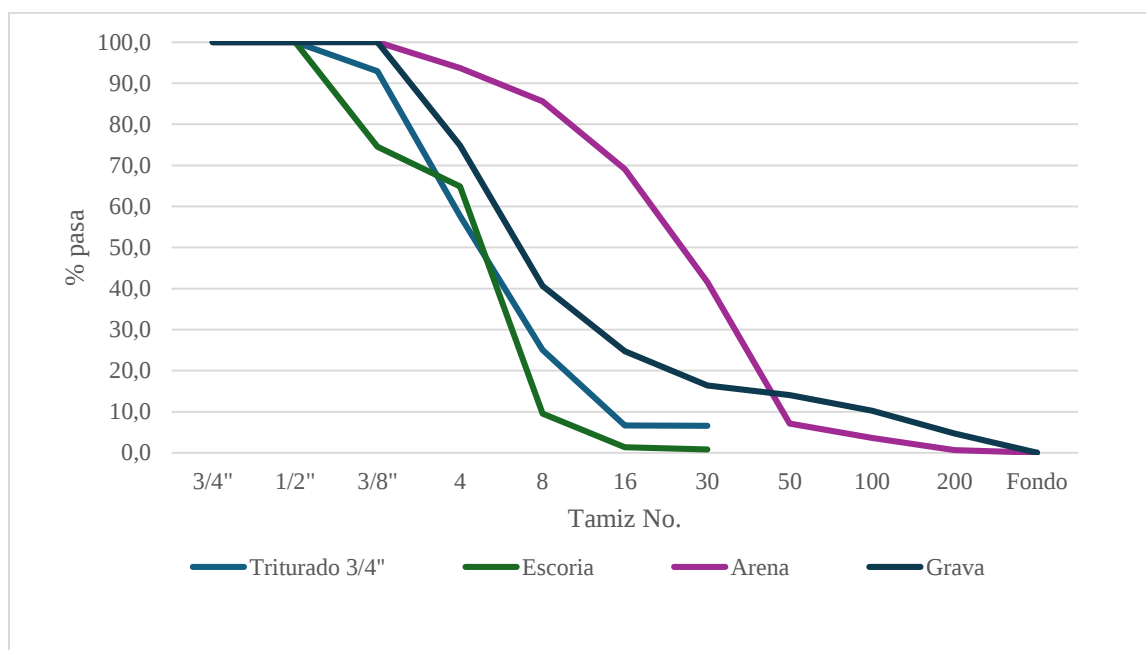
De otro lado, en cuanto al curado, Guevara et al. (2011) señalan que es un proceso crucial para la resistencia del concreto, pues en el peor de los casos conlleva a pérdidas de hasta un 30% de los valores de resistencia esperada; en general, a los 7 días el concreto desarrolla el 70% de su resistencia, a los 14 días alcanza un 85% de ésta y a los 28 días, es estima, alcanza su máximo.

En línea con lo anterior, así como con el diseño experimental proyectado en la metodología, las muestras de las mezclas de concreto se dejaron en los moldes por 24 horas para obtener las viguetas, y luego, se desencofraron para iniciar el curado a los 7, 14 y 28 días para cada ejemplar.

7.1. Caracterización de los agregados finos y gruesos

En primera instancia, se hace referencia a los resultados obtenidos en el análisis granulométrico para los agregados gruesos y finos que se usaron, es decir, el triturado pétreo $\frac{3}{4}$ ", la escoria negra, la grava y la arena. La Figura 19 muestra el porcentaje de partículas que pasan en función del tamiz, es decir, el tamaño de partícula, para cada uno de los agregados. Pese a que el triturado $\frac{3}{4}$ " y la escoria se usaron como agregados gruesos, existen diferencias en la composición granulométrica, por ejemplo, en tamaños entre $\frac{3}{8}$ " y No. 16.

Figura 19. Porcentaje de partículas que pasan en función del tamiz para los agregados



Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 15 sintetiza la granulometría de cada agregado que se usó en las mezclas de concreto con relación a las categorías de tamaño de partícula grava, arena y finos.

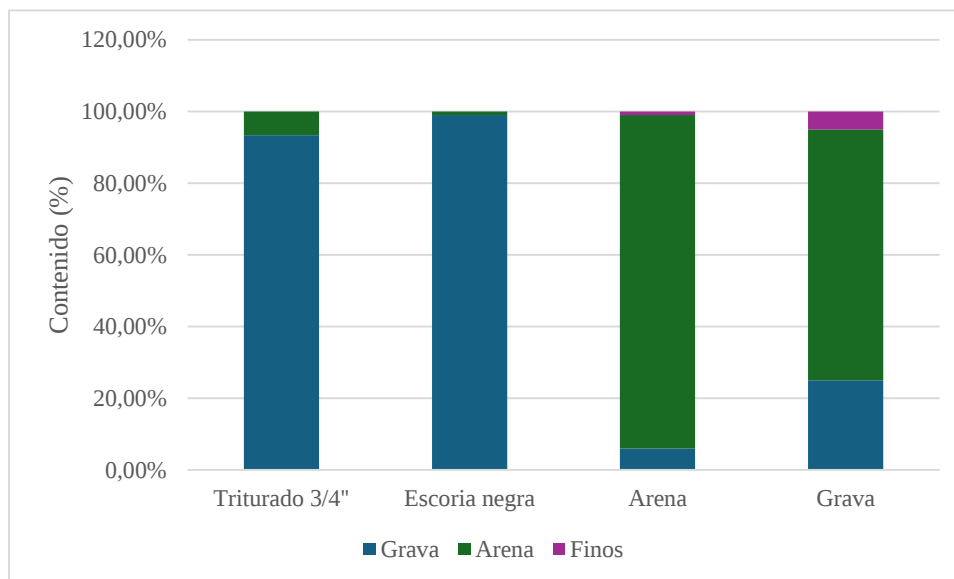
Tabla 15. Granulometría de los agregados para la mezcla

Tipo	Triturado 3/4"	Escoria negra	Arenas	Grava
	(%)	(%)	(%)	(%)
Grava	93,42	99,01	6,02	25,00
Arena	6,61	1,00	93,01	70,00
Finos	0,00	0,00	1,00	5,00
Total	100,00	100,00	100,00	100,00

Fuente: Elaboración propia.

Luego, la Figura 19 permite visualizar la composición de cada agregado con respecto a su contenido porcentual de grava, arena y finos.

Figura 20. Granulometría de los agregados de las mezclas de concreto



Fuente: Elaboración propia.

En el análisis de las granulometrías, se centró la atención en la comparación entre los triturados de tamaño 3/4 pétreos y la escoria. Los resultados mostraron que, en el tamiz de 3/4, la escoria retuvo un 18.4% más de material que el agregado pétreo; sin embargo, en el tamiz de 1/2, el agregado pétreo retuvo un 25.6% más que la escoria. Las gráficas indican que el agregado pétreo presenta una distribución de partículas más uniforme y estable. A pesar de esta diferencia, esto no implica necesariamente que la escoria no sea utilizable, ya que se pueden incorporar otros agregados para estabilizar la distribución de partículas en el diseño final de la mezcla. En las cinco muestras analizadas para concreto, se observó que la distribución de partículas se mantenía dentro de los parámetros aceptables establecidos para los porcentajes mínimos y máximos en cada uno de los tamices.

En cuanto al porcentaje de finos, Gutiérrez (2003) sugiere que los agregados gruesos deberían contener un porcentaje entre el 1% y el 3% para que se favorezca la adherencia de las partículas con el cemento al producir mezclas de concreto. Según la Tabla 15, los porcentajes de finos en el triturado $\frac{3}{4}$ " y la escoria tiende a cero (0), y en la grava, se estima, es del 5% aproximadamente, siendo porcentajes que se encuentran fuera del rango recomendado. Desde esta perspectiva, la granulometría de los agregados gruesos y su gradación no es óptima, incrementando las posibilidades de tener problemas de segregación o en la adherencia de los componentes en las mezclas de concreto, ya sea convencional o modificada con escoria. En cuanto al agregado fino, la arena, se observa que los porcentajes de partículas que pasan por cada uno de los tamices, cumplen con los requerimientos de la granulometría que se exponen en la NTC 174:2018 para agregados finos para uso en concretos, (ICONTEC, 2018). La Tabla 16 permite comparar los rangos de porcentajes que pasan según el tamiz en la norma, frente a los porcentajes obtenidos en el análisis granulométrico de la arena usada en las mezclas de concreto.

Tabla 16. Comparación de la granulometría para agregados finos de la arena frente a la NTC 174:2018

Agregados finos		
Tamiz	% que pasa	
	(NTC 174:2018)	% que pasa
3/8"	100	100
No. 4	95-100	93,70
No. 8	80-100	85,61
No. 16	50-85	69,11
No. 30	25-60	41,54
No. 50	5-30	7,23
No. 100	0-10	3,61
No. 200	0-3	0,72

Fuente: Elaboración propia.

En esa misma línea, en la NTC 174:2018 se dispone que el módulo de finura debe estar entre 2,3 y 3,1 para que no haya problemas de segregación en las mezclas, el cual, surge cuando la arena es muy fina, a razón de lo cual, es posible afirmar que el módulo de finura de 3,0 obtenido para la arena de río es adecuado para no afectar negativamente las propiedades del concreto cuando su aplicación es en pavimentos, (ICONTEC, 2018).

La Tabla 17, sintetiza los resultados que se obtuvieron para la masa unitaria promedio suelta y compacta de cada uno de los agregados, así como el peso específico nominal y la absorción de agua.

Tabla 17. Resultados de la masa unitaria, el peso específico nominal y la absorción de agua de los agregados

Propiedad	Unidades	Triturado 3/4"	Escoria	Arena	Grava
Masa unitaria suelta promedio	g/cm ³	1,31	1,33	1,42	1,97
Masa unitaria compacta promedio	g/cm ³	1,45	1,49	1,61	-
Peso específico nominal	Adim.	2,68	3,34	1,85	2,74
Absorción	%	1,52	1,65	35,71	1,82

Adim. = Adimensional

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, comparando la escoria y el triturado $\frac{3}{4}$, los índices de alargamiento y aplanamiento, en general, fueron mayores para el material de triturado $\frac{3}{4}$ ” como se observa en las Tablas 18-20. Altos índices implican mayor cantidad de partículas aplanadas y largas, lo cual no es favorable en concretos en tanto reduce la trabajabilidad del material y afecta su durabilidad, (INVIAS, 2012). Asimismo, Gutiérrez (2003) explica que no es recomendable trabajar con agregados que tengan altos contenidos de partículas planas y alargadas debido a que, produce bajas masas unitarias y disminuye la resistencia mecánica del concreto por su tendencia a ubicarse horizontalmente.

Ciertamente, en la Tabla 17 se aprecia que la masa unitaria del triturado es ligeramente menor a la de la escoria. Luego, es posible afirmar que, desde éste aspecto, la escoria parece ser una mejor opción como agregado en las mezclas de concreto.

El análisis del índice de alargamiento reveló que el triturado pétreo de tamaño $\frac{3}{4}$ presenta un 4.92% más en comparación con la escoria, mientras que, en términos de aplanamiento, el agregado pétreo supera a la escoria en un 8.23%. Estos resultados indican que la escoria tiene un comportamiento superior en cuanto a la distribución interna de la mezcla, lo que se traduce en una mejor trabajabilidad y durabilidad del concreto. Además, su menor área de vacíos contribuye a minimizar los cambios volumétricos, lo que se refleja positivamente en la resistencia del concreto hidráulico final.

Tabla 18. Índices de alargamiento y aplanamiento para el triturado $\frac{3}{4}$ por fracción

Tamiz		Total Fracción (g)	Parte Larga (g)	Parte Plana (g)	Índice Alargamiento (%)	Índice Aplanamiento (%)
Pasa	Retiene					
1 1/2"	1"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1"	3/4"	66,94	0,00	18,70	0,00	27,95
3/4"	1/2"	1943,30	348,15	246,26	17,91	12,67
1/2"	3/8"	298,00	149,64	19,27	50,20	6,44
3/8"	1/4"	16,51	7,52	0,00	45,45	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Índices de alargamiento y aplanamiento para la escoria negra por fracción

Tamiz		Total Fracción (g)	Parte Larga (g)	Parte Plana (g)	Índice Alargamiento (%)	Índice Aplanamiento (%)
Pasa	Retiene					
1 1/2"	1"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1"	3/4"	547,54	0,00	25,31	0,00	4,62
3/4"	1/2"	1293,14	255,76	52,82	19,77	4,08
1/2"	3/8"	215,81	77,91	3,44	36,10	1,58
3/8"	1/4"	26,00	16,57	1,75	63,46	6,53

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Índices globales de alargamiento y aplanamiento para la el triturado $\frac{3}{4}$ ” y la escoria negra

Índice	Triturado $\frac{3}{4}$	Escoria negra
Índice Global Alargamiento (%)	21,73	16,81
Índice Global Aplanamiento (%)	12,22	3,99

Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, a partir del ensayo de Máquina Los Ángeles, se observó que la escoria tiene un porcentaje de pérdida de material más bajo que el triturado $\frac{3}{4}$ ”, siendo del 16,30% en comparación con el 19.90%, respectivamente (ver Tablas 21 y 22).

Según los resultados obtenidos, se observó una diferencia del 3.58% a favor de la escoria, lo que indica que este material presenta una mayor resistencia a la degradación de los agregados gruesos. Esto se traduce en una mayor durabilidad y resistencia al desgaste, lo cual se manifestará con el tiempo debido al paso de vehículos sobre el pavimento rígido. Por otro lado, la escoria negra al tener bajo porcentaje de desgaste, se pronostica un comportamiento de excelente funcionamiento bajo condiciones de tráfico real

Tabla 21. Resultados del ensayo con la Máquina Los Ángeles, triturado ¾"

Tipo de Material	Triturado ¾”		Fecha de Realización	19 de marzo de 2024
Procedencia:	Nobsa	Agregado Grueso	Norma aplicable INV-E-218	
Máquina Los Ángeles				
Peso Inicial (g)			5205,82	
Peso Final (g)			4171,21	
% Perdida			19,87	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Resultados del ensayo con la Máquina Los Ángeles, escoria negra

Tipo de Material	Escoria negra		Fecha de Realización	19 de marzo de 2024
Procedencia:	Diacó	Agregado Grueso	Norma aplicable INV-E-218	
Máquina Los Ángeles				
Peso Inicial (g)			5125,00	
Peso Final (g)			4289,77	
% Perdida			16,29	

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, de acuerdo con, Gutiérrez (2003), los agregados gruesos deben ser resistentes ante el desgaste con la Máquina Los Ángeles, siendo un límite recomendado para concretos y pavimentos rígidos, porcentajes inferiores al 35%, el cual, no se excede ni en el caso del triturado ni en el caso de la escoria negra. Por ende, es posible sugerir que la escoria

negra que proviene de los hornos de arco eléctrico, es un material más resistente que el triturado ante el desgaste por abrasión y de mayor calidad para ser usado en el sector de las construcciones donde el material estará expuesto a diferentes factores y condiciones ambientales que implican desgaste.

En ese mismo orden, el ensayo con micro-deval para medir la resistencia a la abrasión y la durabilidad de los agregados, también muestra en sus resultados que el porcentaje de material perdido es mayor en el caso del triturado pétreo $\frac{3}{4}$ ” con respecto al porcentaje de pérdida que se determinó en el caso de la escoria negra de horno de arco eléctrico (Ver Tablas 23 y 24). Cabe señalar que, a diferencia de otros ensayos, el micro-deval permite analizar el comportamiento de los agregados en un estado húmedo, donde la presencia de agua reduce en sí misma, la resistencia, (INVIAS, 2012). De aquí, que los porcentajes de pérdida de masa sean inferiores a los que se obtuvieron con la Máquina Los Ángeles. En lo que concierne el resultado del ensayo de micro Deval nos afirma el porcentaje de desgaste sobre las muestras el cual tiene un efecto de calidad y se logra afirmar que las muestras tienen correlación sobre el ensayo de la máquina de Los Ángeles por ende el uso de la escoria nos afirma que es viable mezclarlo para Concretos hidráulicos

Tabla 23. Resultados del ensayo Micro-deval para el triturado $\frac{3}{4}$ ''

Tipo de Material	Triturado $\frac{3}{4}$ ''		Fecha de Realización	19 de marzo de 2024
Procedencia:	Nobsa	Agregado Grueso	Norma aplicable	INV E-238
Micro-Deval				
Peso Inicial (g)				1604,40
Peso Final (g)				1410,01
% Perdida				12,11

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Resultados del ensayo Micro-deval para la escoria negra

Tipo de Material	Escoria negra		Fecha de Realización	19 de marzo de 2024
Procedencia:	Diacó	Agregado Grueso	Norma aplicable	INV-E-238
Micro-Deval				
Peso Inicial (g)				1522,73
Peso Final (g)				1389,44
% Perdida				8,75

Fuente: Elaboración propia.

Para el ensayo de resistencia mecánica de 10% de finos solo se realizó al material de triturado $\frac{3}{4}$, donde se encuentra que éste cumple con los requerimientos en tanto los porcentajes resultantes están por encima del rango que exige la especificación 500 del INVIAS (2012). La Tabla 25 muestra los resultados de este ensayo, y la Tabla 26 muestra los requerimientos que para pavimentos de concreto hidráulico según la norma aplicable.

Se obtuvo una resistencia de 172 kN para la muestra seca y un 99% en la relación seca/húmeda. Esto sugiere que los agregados poseen características que beneficiarán la mezcla, tales como trabajabilidad, resistencia, durabilidad y control del diseño a elaborar. Además, se obtuvieron parámetros que optimizaron cada uno de los agregados como insumos en el diseño final del concreto, lo que permite reducir el consumo de cemento.

Tabla 25. Resultados ensayo de resistencia mecánica de 10% de finos

Muestra No. 1						Cilindro	1	Estado	Seca
Masa inicial (g)	W ret. (g)	% ret.	W pasa (g)	% pasa		Fuerza aplicada (kN.)		Fuerza necesaria (kN.)	
2702,4	2474,31	91,56	228,00	8,40		172,00		193,61	
Muestra No. 2						Cilindro	2	Estado	Saturada
Masa inicial (g)	Masa húmeda (g)	W ret. (g)	% ret.	W pasa (g)	% pasa	Fuerza aplicada (kN.)		Fuerza necesaria (kN.)	
2632,82	2661,21	2416,72	91,56	209,91	8,01	170,44		199,25	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Requisitos de agregado para pavimentos de concreto hidráulico (Tabla 500-4)

Resistencia mecánica por el método de 10% de finos		
Valor en seco, mínimo (kN.)	E-224	90
Relación húmedo/seco min (%)		75

Fuente: INVIAS (2012).

Para la escoria no se realizó debido ensayo ya que este material es consistente.

7.2. Resistencia a la flexión del concreto

La Tabla 27 sintetiza los resultados obtenidos para un tiempo de curado de 7 días, al igual que los parámetros usados en los ensayos para determinar la resistencia a la flexión de cada muestra. Como se observa, las muestras de concreto con porcentajes de escoria del 50%

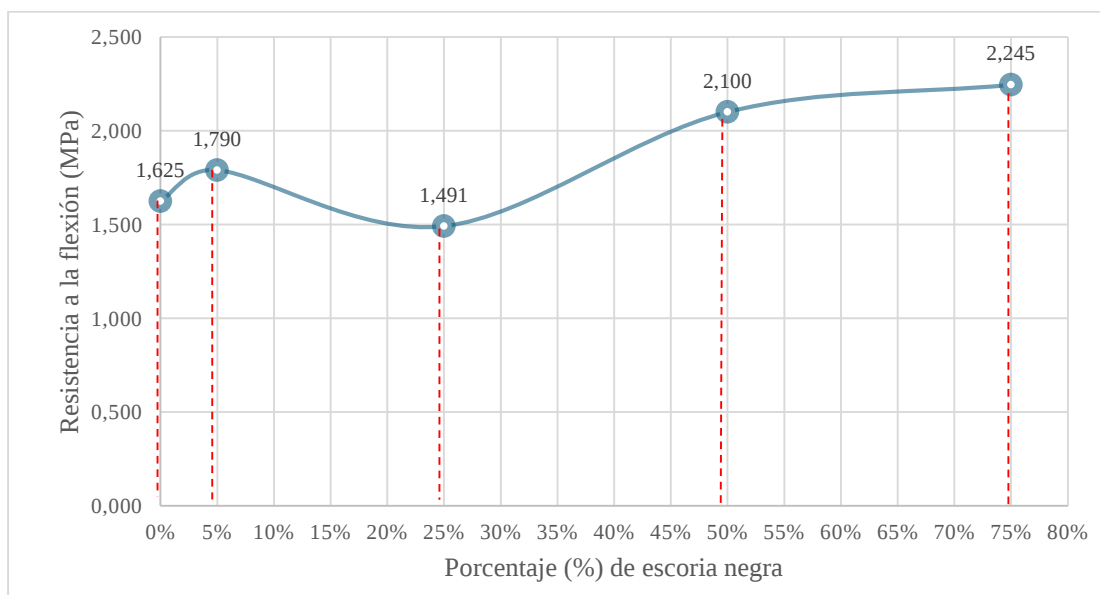
y 75% corresponden a los mayores valores de resistencia a la flexión (>2.00 MPa) y módulo de rotura, mientras que la muestra con un porcentaje de 25% presentó los menores valores en éstas propiedades.

Tabla 27. Propiedades de las mezclas de concreto a los 7 días

Escoria	Resistencia a flexión (MPa)	Carga Aplicada (kN.)	Luz libre entre apoyos (mm)	Ancho Promedio (cm)	Altura Promedio (cm)	Módulo de rotura (MPa)
0%	1,62	11680	470	15,03	14,97	1630,18
5%	1,79	12580	480	15,07	14,90	1805,23
25%	1,49	10720	470	15,00	14,97	1499,52
50%	2,10	15049	470	15,17	15,00	2072,68
75%	2,24	15787	480	15,07	14,93	2255,33

Fuente: Elaboración propia.

Figura 21. Resistencia a la flexión en las muestras de concreto con edad de 7 días



Fuente: Elaboración propia.

En conformidad con la Tabla 27 y la Figura 21, la tendencia general en todo el grupo de muestras con curado de 7 días, permite sugerir que a medida que se incrementa el contenido de escoria como reemplazo de los agregados gruesos, también se incrementa la resistencia a la flexión del concreto, por tanto, su módulo de rotura. Sin embargo, los resultados de la muestra con 25% de escoria se salen de dicha tendencia, identificando como factor diferencial una menor carga aplicada en comparación con las demás muestras. Dado que solo se disponía de una sola muestra, existe incertidumbre sobre la existencia de errores experimentales y se pierde confiabilidad en los resultados obtenidos.

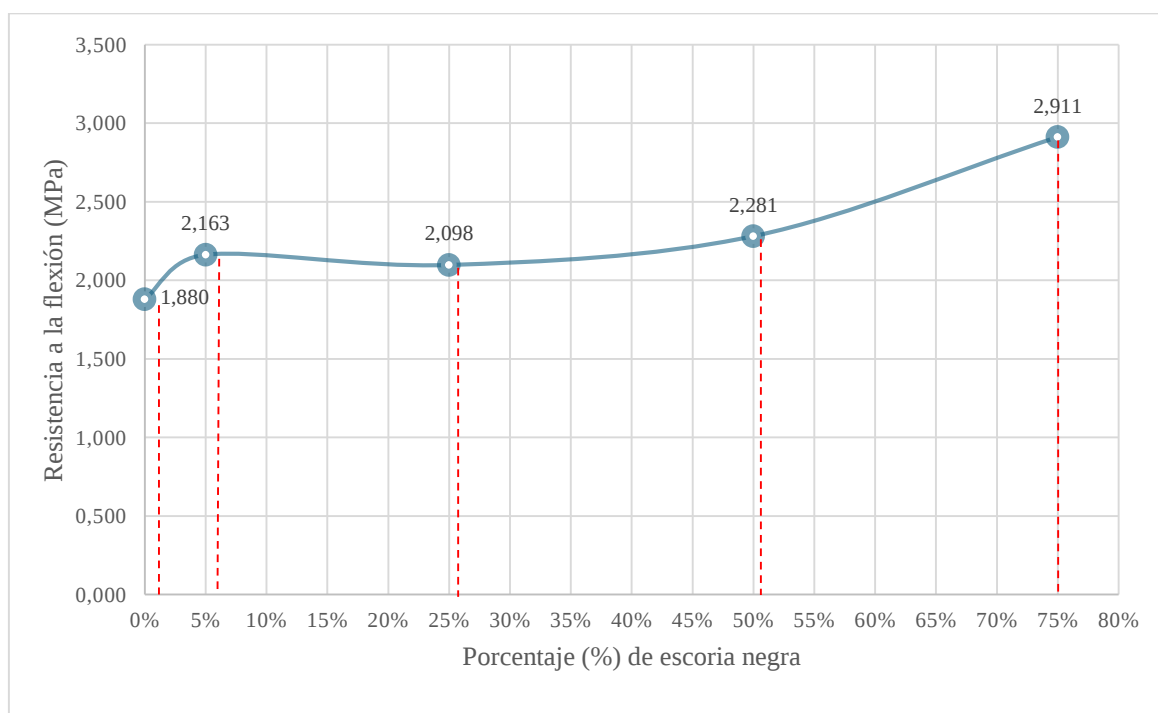
Ahora bien, para el grupo de muestras con curado de 14 días (ver Tabla 28 y Figura 22), se observa un incremento de la resistencia a la flexión y del módulo de rotura frente a los resultados obtenidos con las muestras de concreto analizadas a los 7 días de curado. En este caso, se observa un incremento generalizado de éstas propiedades mecánicas en correspondencia al aumento del porcentaje de escoria contenida en las mezclas de concreto pese a que la muestra con 25% de escoria, una vez más, tiene una ligera desviación de la tendencia.

Tabla 28. Propiedades de las mezclas de concreto a los 14 días

Escoria	Resistencia a flexión (MPa)	Carga Aplicada (kN.)	Luz libre entre apoyos (mm)	Ancho Promedio (cm)	Altura Promedio (cm)	Módulo de rotura (MPa)
0%	1,88	13342	470	15,07	14,93	1866,33
5%	2,16	15210	480	15,10	14,97	2158,46
25%	2,09	15037	470	15,03	14,87	2127,04
50%	2,28	16345	470	15,03	15,00	2271,15
75%	2,91	20469	480	15,03	14,97	2917,64

Fuente: Elaboración propia.

Figura 22. Resistencia a la flexión en las muestras de concreto con edad de 14 días



Fuente: Elaboración propia.

Por último, en las muestras con curado de 28 días, donde se espera máxima resistencia desarrollada en el concreto, el comportamiento y las tendencias observadas a los 7 y los 14 días se mantienen (ver Tabla 29 y Figura 23). Por una parte, se observa un incremento en la resistencia y el módulo de rotura para todas las muestras. Luego, se identifica una tendencia creciente de éstas propiedades mecánicas a medida que se incrementa el porcentaje de escoria en la muestra, con una ligera desviación en la muestra con 25% de escoria. Se resalta que, con un curado de 28 días, la muestra de concreto con un 75% de escoria negra en reemplazo de agregados gruesos logra cumplir con los parámetros de diseño que se establecieron inicialmente, es decir, se obtiene un módulo de rotura mayor a 3.00 MPa.

Dentro del análisis, el diseño de la mezcla de concreto hidráulico comprendió el uso de 0%, 25%, 50% y 75% de escoria. Dentro de los parámetros de diseño, se optó por aproximadamente 465 kg de cemento para todas las muestras (9 bultos de cemento por 1 metro cubico). En el análisis a los siete días, se observa que la muestra número tres presenta un incremento del 11.27% en comparación con la muestra número uno. Respecto a la muestra número cuatro (4) y número cinco (5), el incremento es sustancial, ya que hay un incremento de 27% y 38.3% respecto a la muestra número uno (1).

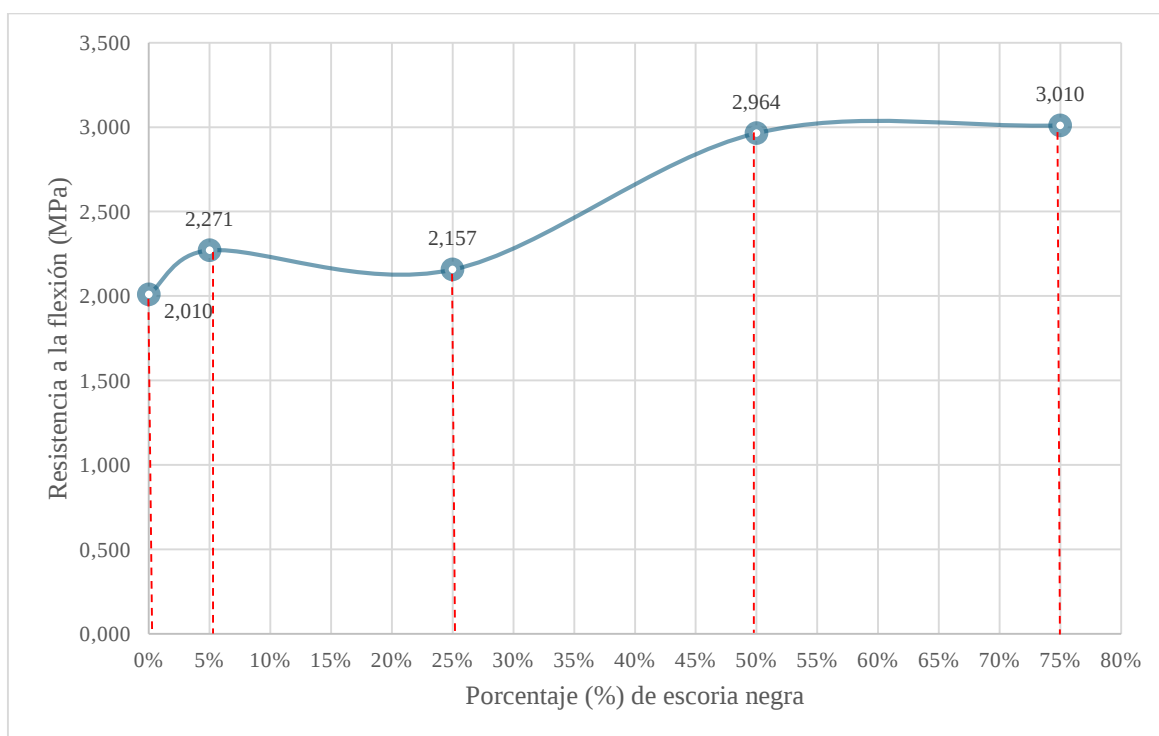
A los 28 días, se encontraron incrementos significativos en la resistencia: la muestra tres, cuatro y cinco (3,4,5) mostró aumentos del 11%, 44% y 47.4% de resistencia. Todo esto está relacionado con el tipo de agregado utilizado en las mezclas.

Tabla 29. Propiedades de las mezclas de concreto a los 28 días

Escoria	Resistencia a flexión (MPa)	Carga Aplicada (kN.)	Luz libre entre apoyos (mm)	Ancho Promedio (mm)	Altura Promedio (mm)	Módulo de rotura (MPa)
0%	2,01	14634	470	15,07	14,93	2047,06
5%	2,27	15969	480	15,10	14,97	2266,17
25%	2,15	15455	470	15,03	14,87	2186,17
50%	2,96	21238	470	15,03	15,00	2951,03
75%	3,01	21165	480	15,03	14,97	3016,85

Fuente: Elaboración propia.

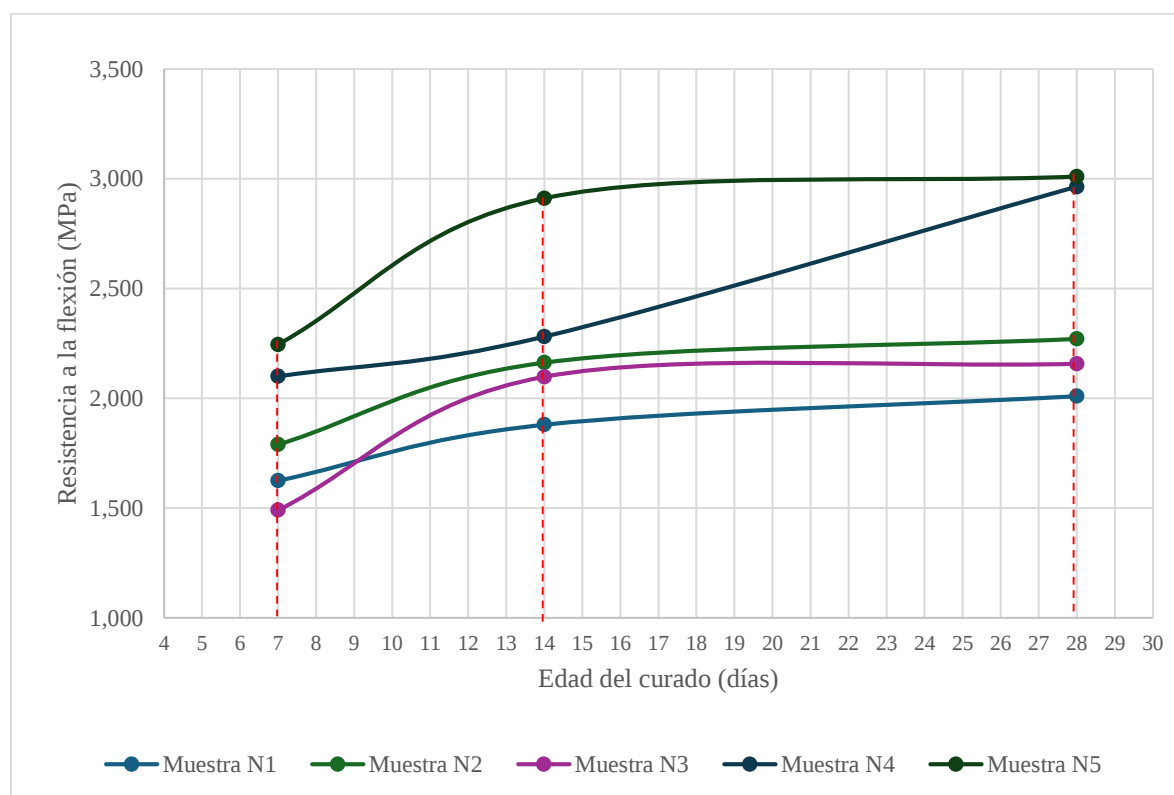
Figura 23. Resistencia a la flexión en las muestras de concreto con edad de 28 días



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 24, se resumen los resultados obtenidos de la resistencia a la flexión en función de la edad de curado para cada muestra de concreto. Para todas las muestras se observa un incremento significativo de la resistencia entre los días 7 y 14. Así mismo, se puede reconocer que, en general, a mayor cantidad de escoria negra, mayor es el valor de la resistencia, aunque solo la muestra con 75% de escoria con una edad de curado de 28 días, responde a los parámetros de diseño para su uso en pavimentos.

Figura 24. Resistencia a la flexión en las muestras de concreto experimentales en función de la edad de curado



Fuente: Elaboración propia.

Al comparar todas las muestras de concreto modificado con escoria negra respecto a la muestra de concreto convencional (0% de escoria), es posible sugerir que tanto la carga aplicada como el módulo de rotura es mayor cuando se reemplazan los agregados gruesos

con escoria, puesto que la muestra con el 25% de escoria está muy parecida al convencional ya que no es uniforme el porcentaje de escoria ni de triturado $\frac{3}{4}$ ” y la mezcla quedaría desnivelada en los agregados gruesos. En línea con los resultados anteriores, donde la muestra con el 75% de escoria presentó la mayor resistencia, según los laboratorios de caracterización puesto que la forma tiene aberturas, esta es mucho más sólida.

El incremento de la resistencia en las mezclas de concreto a medida que se aumenta la cantidad de escoria de horno de arco eléctrico coincide con los resultados de diferentes investigaciones donde se usa la escoria negra como agregado grueso natural en concretos; según se explica, dicha tendencia se debe a las elevadas propiedades físicas del subproducto siderúrgico tales como su densidad, su dureza y su rugosidad, además de su resistencia mecánica que se traslada a la mezcla del concreto y a la excelente calidad de la zona de transición interfacial, (Suárez, 2018; Mayor et al., 2020; Rojas-Manzano et al., 2021).

Por su parte, Martínez (2015) encontró que las mezclas de concreto con un porcentaje de 75% de escoria negra fueron las que presentaron un comportamiento óptimo y un máximo de resistencia frente a porcentajes mayores o menores de reemplazo de los agregados. En ese sentido, aunque en este trabajo no se analizaron muestras con 100% de escoria como reemplazo, los resultados de, Martínez (2015) permiten sugerir que la granulometría y la composición química del subproducto siderúrgico se convierten en una desventaja disminuyendo su resistencia y su módulo de rotura.

Pese a ello, es importante resaltar que las limitaciones en el uso de la escoria negra, ya sea como agregado fino o grueso en las mezclas de concreto, se remiten a su inestabilidad volumétrica a razón de su susceptibilidad a presentar expansión por reacciones que se asocian

con su composición química y mineralógica, aspectos que no se incluyeron en este análisis, (Rojas-Manzano et al., 2021).

Para finalizar, resulta relevante señalar que, tras una revisión bibliográfica sobre el uso de escoria negra en las mezclas de concreto, se identificó una mayor tendencia a analizar propiedades como la resistencia a la compresión y la durabilidad de las mezclas de concreto modificadas, frente a la resistencia a la flexión o el análisis de los índices de alargamiento y aplanamiento como se realiza en este trabajo. Este es uno de los hechos que limita el análisis de los resultados en este trabajo mediante aproximaciones por comparación y contraste en otras experiencias.

Luego, se considera relevante mencionar que, aunque se pueden hacer estimaciones y realizar generalizaciones sobre las propiedades o el comportamiento de las mezclas de concreto modificadas, lo cierto es que cada insumo es diferente, por tanto, la exploración de nuevos diseños debe ser contemplada en su totalidad desde la caracterización de los materiales que se usaran.

Tabla 30. Cuadro comparativo

	ENSAYO	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PARAMETRO	COMPARACION
	Alargamiento	21,73	16,81	<35%	El % de agregados alargados y aplanados en la muestra de concreto con escoria con respecto al concreto convencional muestra mayor eficiencia en la mezcla reflejado en la manejabilidad como en su resistencia final
	Aplanamiento	12,22	3,99	<35%	
	Máquina de los ángeles	19,87	16,29	<40%	La mezcla de concreto con escoria, tiene 3,49% de menor desgaste en comparación con la mezcla de concreto convencional.
	Micro Deval	12,11	8,75	<30%	La mezcla de concreto con escoria, tiene 3,36% de menor degradación por abrasión en comparación con la mezcla de concreto convencional, esto significa mayor resistencia al paso de los vehículos.
10% Finos	Muestra seca (KN)	172	-	>90 KN	Observamos unos resultados óptimos y de superioridad como lo es 172 KN para una muestra seca y con respecto a la relación seco húmedo se obtuvo un 99% por lo tanto son pedos de buen manejo durabilidad y resistencia para la mezcla total del concreto hidráulico
	Muestra Hum (%)	99	-	>75%	
	Resistencia a Flexión (28 días)Mpa	2,0	3,0	3,0	La muestra N2 se observa un mayor resultado y eficiencia sobre la muestra N1, afirmando el uso de escoria para aumentar su resistencia a la flexión.

8. Conclusiones y Recomendaciones

A partir del trabajo realizado, es posible establecer las siguientes conclusiones:

- El análisis realizado sobre el índice de alargamiento y aplanamiento de los agregados revela que, aunque el triturado pétreo de tamaño 3/4 presenta ventajas en estos índices, la escoria demuestra un comportamiento superior en términos de distribución interna de la mezcla. Esto se traduce en una mejor trabajabilidad y durabilidad del concreto, así como en una reducción de los cambios volumétricos gracias a su menor área de vacíos. Estos factores son cruciales para mejorar la resistencia del concreto hidráulico final. Por lo tanto, la utilización de escoria como agregado en las mezclas de concreto no solo es viable, sino que también puede resultar en un material más eficiente y sostenible, optimizando tanto el rendimiento estructural como los costos asociados.
- De acuerdo con la NTC 174:2018, el módulo de finura de los agregados es un factor crucial para evitar problemas de segregación en las mezclas de concreto. El módulo de finura de 3,0 obtenido para la arena lavada se encuentra dentro del rango recomendado (2,3 a 3,1), lo que indica que es adecuado para su uso en mezclas de concreto. Esto sugiere que la arena no afectará negativamente las propiedades del concreto, garantizando así una mezcla homogénea y eficiente que cumple con los estándares requeridos.
- El análisis granulométrico revela diferencias significativas entre la escoria y los triturados pétreos, destacando que, aunque la escoria retiene más material en el tamiz de 3/4, el agregado pétreo muestra una mayor uniformidad en su distribución de partículas. Sin embargo, estas variaciones no descalifican el uso de la escoria, ya que es posible

combinarla con otros agregados para lograr una mezcla equilibrada y estable. Además, las muestras de concreto analizadas cumplen con los parámetros establecidos para la distribución de partículas, lo que sugiere que la escoria puede ser una opción viable en aplicaciones de construcción, contribuyendo a un enfoque más sostenible.

- En el análisis realizado, se estableció que el diseño empleó un promedio de nueve bultos de cemento por metro cúbico en todas las muestras evaluadas. En la primera muestra (1), que contiene un 0% de escoria, el módulo de rotura a los 28 días fue de 2.0 MPa, lo cual no cumple con el requisito establecido. Este resultado resalta la necesidad de continuar incrementando el porcentaje de escoria en las mezclas. Se sugiere que al aumentar el contenido de escoria al 75%, los costos de producción podrían reducirse, ya que no sería necesario añadir más bultos de cemento para alcanzar el mínimo requerido de 3 MPa. De hecho, la quinta muestra (5) mostró un módulo de rotura de 3.02 MPa a los 28 días, lo que indica una disminución en los costos de insumos (cemento) y asegura el cumplimiento del requisito.
- En el análisis de la resistencia a flexión, se observó que el ciclo de curado de las vigas de concreto hidráulico muestra un aumento del 26% en la resistencia de la muestra uno entre los días siete, catorce y veintiocho. Esto indica que el cemento actúa de manera eficiente, ya que una mayor duración del curado se traduce en una mayor resistencia. Asimismo, para las muestras dos, tres, cuatro y cinco, se registró un incremento significativo en la resistencia gracias al uso de escoria.
- Los resultados del ensayo de resistencia a flexión sugieren que se logra una resistencia óptima conforme a los porcentajes de escoria utilizados en cada muestra, lo que implica una dosificación adecuada de los agregados. Esto también se refleja en la manejabilidad

del concreto. Es importante destacar que la incorporación de escoria en concretos hidráulicos puede aumentar la densidad del material; por lo tanto, es fundamental contar con una buena estructura del suelo donde se aplique el concreto con escoria.

- El aprovechamiento de la escoria negra del horno de arco eléctrico representa una estrategia efectiva para mitigar el impacto ambiental, transformando un subproducto en una materia prima valiosa. Este enfoque no solo genera empleo y reduce las emisiones de CO₂, sino que también disminuye costos administrativos y evita la necesidad de adquirir terrenos para rellenos. La viabilidad del proyecto está respaldada por la infraestructura existente y los resultados positivos de los ensayos, lo que abre nuevas oportunidades para una construcción más sostenible y eficiente.
- El análisis granulométrico de los agregados gruesos permitió establecer que la gradación no es la óptima de acuerdo con los requerimientos para concretos, en especial, por los contenidos que se encontraron de finos. Dicho escenario, posibilita la existencia de problemas de segregación o adherencia de los componentes en las mezclas de concreto. Con respecto al agregado fino, es decir, la arena, la granulometría y el módulo de finura cumple con los requerimientos que se disponen normativamente en la NTC 174:2018 en la producción de concretos.
- Ahora bien, con respecto al ensayo con la máquina Los Ángeles, los resultados evidencian que la escoria negra tiene una mayor resistencia al desgaste por abrasión (16,30% de pérdida) en comparación con el triturado natural $\frac{3}{4}$ (19,90% de pérdida). Luego, del ensayo Micro-deval, los resultados confirman esta afirmación, aunque los porcentajes de pérdida de masa son menores que en el ensayo de la Máquina Los Ángeles debido al efecto negativo del agua en la resistencia de los materiales.

Lo anterior es de gran relevancia para hablar de resistencia, calidad y estabilidad de los materiales que se usan en la construcción de carreteras y pavimentos. Además, desde esta perspectiva, la escoria negra tiene mejores propiedades de resistencia y durabilidad frente al triturado pétreo.

- La escoria negra, un subproducto de la industria siderúrgica, tiene gran potencial para ser usado como alternativa sostenible y amigable con el medio ambiente en la manufactura de concretos hidráulicos para pavimentos rígidos. Sin embargo, el diseño de las mezclas siempre debe partir de un análisis preliminar, de ser posible, de sus composición química y mineralógica, así como de sus propiedades físicas y mecánicas, pues sus características dependen de la naturaleza de la materia prima y de su producción. No todas las escorias son iguales.

En lo que se refiere a recomendaciones, lo primero que se destaca es que los resultados obtenidos, más allá de las generalidades, aplican únicamente para la escoria que se usó, pues su origen, su producción y sus características son factores diferenciales frente a otras muestras de escoria negra, aun cuando se generen en el horno de arco eléctrico que se emplea en la industria del acero.

En ese sentido, se insta a desarrollar investigaciones que den continuidad a este trabajo a través de la caracterización las escorias negras y la determinación de otras propiedades tales como la composición química y mineralógica, la morfología de los granos de los componentes, las propiedades del estado fluido, y la durabilidad del concreto modificados con la escoria para evaluar su desempeño mecánico, así como la viabilidad de su aplicación en pavimentos desde toda perspectiva.

Igualmente, como se ha expuesto en otros referentes de literatura, los lixiviados con metales pesados o la inestabilidad volumétrica que conlleva a la expansión/compresión de los concretos con escorias siderúrgicas son limitaciones que requieren atención debido a los impactos o daños que pueden generarse en el mediano y largo plazo. Por lo tanto, el enfoque de los análisis en futuro trabajos puede remitirse a estas desventajas que generan problemas en el uso de las escorias negras de horno de arco eléctrico en concretos hidráulicos con el fin de encontrar alternativas de solución factibles y viables.

Futuras líneas de investigación:

1. Análisis fisicoquímico de la escoria para su aplicación en concreto hidráulico destinado a la fabricación de placas huellas.
2. Análisis de uso de escoria en concretos hidráulicos para obras de drenaje, tales como cunetas, box culverts y tuberías.
3. Llevar a cabo investigaciones sobre otros materiales que puedan disminuir la densidad del concreto hidráulico con escoria.

9. Glosario

1. **Pavimento:** Superficie construida para el tránsito de vehículos y peatones.
2. **Asfalto:** Material bituminoso utilizado en la construcción de pavimentos flexibles.
3. **Hormigón:** Mezcla de cemento, agua, arena y grava utilizada en pavimentos rígidos.
4. **Base:** Capa que se coloca debajo del pavimento para proporcionar soporte.
5. **Subbase:** Capa situada por debajo de la base, que mejora la estabilidad del pavimento.
6. **Drenaje:** Sistema diseñado para eliminar el agua de la superficie del pavimento.
7. **Compactación:** Proceso de aumentar la densidad del material del pavimento mediante presión.
8. **Desgaste:** Pérdida de material en la superficie del pavimento debido al tráfico y condiciones climáticas.
9. **Bacheo:** Reparación de baches o deformaciones en el pavimento.
10. **Junta:** Espacio intencionado entre secciones de pavimento para permitir movimiento.
11. **Fisura:** Grieta en la superficie del pavimento que puede comprometer su integridad.
12. **Textura:** Características superficiales del pavimento que afectan la adherencia y el drenaje.
13. **Grava:** Agregado grueso utilizado en la mezcla de hormigón o como base para pavimentos.
14. **Arena:** Agregado fino utilizado en mezclas de hormigón y mortero.
15. **Cemento:** Material aglutinante utilizado en la fabricación de hormigón.
16. **Pavimento flexible:** Tipo de pavimento que se adapta a las deformaciones del terreno subyacente.

- 17. Pavimento rígido:** Pavimento que no se adapta a las deformaciones, generalmente hecho de hormigón.
- 18. Rehabilitación:** Proceso de restaurar un pavimento deteriorado a su estado funcional.
- 19. Sellador:** Producto aplicado sobre el pavimento para protegerlo contra el agua y otros agentes dañinos.
- 20. Superficie antideslizante:** Tratamiento aplicado al pavimento para mejorar la adherencia y seguridad.
- 21. Aditivos:** Sustancias químicas añadidas al concreto para modificar sus propiedades.
- 22. Hidratación:** Proceso químico en el que el cemento reacciona con el agua para endurecerse.
- 23. Resistencia:** Capacidad del concreto para soportar cargas sin fallar.
- 24. Curado:** Proceso de mantener la humedad del concreto recién vertido para asegurar un buen endurecimiento.
- 25. Fraguado:** Proceso inicial de endurecimiento del concreto después de mezclarlo con agua.
- 26. Compactación:** Método utilizado para eliminar burbujas de aire en el concreto fresco, mejorando su densidad.
- 27. Durabilidad:** Capacidad del concreto para resistir condiciones ambientales adversas a lo largo del tiempo.
- 28. Escoria:** Material residual que se forma durante el proceso de fundición de metales, compuesto por impurezas y otros elementos no deseados.
- 29. Fundición:** Proceso industrial en el que se calienta un metal hasta su punto de fusión para moldearlo en una forma deseada.

30. Impurezas: Sustancias no deseadas que se encuentran en un material, como metales o minerales, que afectan su calidad.

Referencias Bibliográficas

- Agencia Nacional de Infraestructura [ANI] (2020, 6 de agosto). *La reactivación de las obras de infraestructura, el motor que jalonó la economía en los últimos dos años*. Ministerio de Transporte. Disponible en: <https://mintransporte.gov.co/publicaciones/8820/la-reactivacion-de-las-obras-de-infraestructura-el-motor-que-jalono-la-economia-en-los-ultimos-dos-anos/>
- Andrei, H., Cepisca, C. and Grigorescu, S. (2011). Chapter 5. Power Quality and Electrical Arc Furnaces. In: *Power Quality*. United States: IntechOpen (pp. 77-83). Doi: <http://dx.doi.org/10.5772/15996>
- Arribas, I., Santamaría, A., Ruiz, E., Ortega-López, V., & Manso, J. M. (2015). Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete. *Construction and Building Materials*, 90, 68–79. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.003>
- Arroyo, N. F. (2010). Diseño y conservación de pavimentos rígidos [Trabajo de grado, Ingeniería Civil]. *Repositorio Universidad Nacional Autónoma de México*. Disponible en: https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000664060/3/0664060_A1.pdf
- Asociación Latinoamericana del Acero [ALACERO] (2022). Reporte de sustentabilidad 2022. Consultado el 5 de mayo de 2024. Disponible en: https://cms.alacero.org/uploads/Reporte_Sustentabilidad_Alacero_2022_2_ee311f667b.pdf

Asociación Latinoamericana del Acero [ALACERO] (2024). Por sexto mes consecutivo el consumo de acero en América Latina superó los 6Mt. *Noticias*. Consultado el 20 de julio de 2024. Disponible en: <https://www.alacero.org/noticias/por-sexto-mes-consecutivo-el-consumo-de-acero-en-america-latina-supero-las-6-mt>

Asociación Nacional de Empresarios de Colombia [ANDI] (2018). El acero colombiano, columna vertebral para el progreso del país. Consultado el 6 de mayo de 2024. Disponible en: <https://www.andi.com.co/Uploads/LIBRO%20ACERO%20FINAL%20-%20BAJA.pdf>

Asociación Nacional de Empresarios de Colombia [ANDI] (2021). Informe del sector siderúrgico 2019-2020. Consultado el 3 de mayo de 2024. Disponible en: [https://www.andi.com.co/Uploads/ISS%202019%20-2020%20\(2\)_637707766668934393.pdf](https://www.andi.com.co/Uploads/ISS%202019%20-2020%20(2)_637707766668934393.pdf)

Asociación Nacional de Empresarios de Colombia [ANDI] (2022). Informe del sector siderúrgico 2020-2021. Consultado el 3 de mayo de 2024. Disponible en: [https://www.andi.com.co/Uploads/_Informe_Siderurgico_2020_2021%20\(M\)_638052421194700054.pdf](https://www.andi.com.co/Uploads/_Informe_Siderurgico_2020_2021%20(M)_638052421194700054.pdf)

Asociación Nacional de Empresarios de Colombia [ANDI] (2024). Boletín de producción, importaciones y exportaciones, Comité Colombiano de Producciones de Acero. Consultado el 3 de mayo de 2024. Disponible en: https://www.andi.com.co/Uploads/Bolet%C3%ADn_producci%C3%B3n_impos_exp_os.pdf

- Becerra, X. (2024, 14 de marzo). “El de Colombia es un mercado deficitario y necesita más acero del que se produce” *La República*. Consultado el 20 de julio de 2024. Disponible en: <https://www.larepublica.co/economia/colombia-es-un-mercado-deficitario-necesita-mas-acero-del-que-produce-el-mercado-3820561>
- Bonilla, V. M., Quintana, J. A., Carrión, F. J., Martínez, L. A., Hernández, J. A., Gasca, H. M., Hernández, A. y Montes, M. (2017). Análisis del comportamiento estructural de un pavimento de concreto estructuralmente reforzado continuo (PCERC). *Instituto Mexicano del Transporte*. Disponible en: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt509.pdf>
- Cámara Colombiana de la Construcción [CAMACOL] (2022, 20 de diciembre). Informe económico. Proyección sectorial: PIB edificador 2023. Consultado el 30 de abril de 2024. Disponible en: https://camacol.co/sites/default/files/descargables/Informe%20Econ%C3%B3mico%20115_0.pdf
- Camacho, L. F. (2011). Reflexión sobre la industria del acero en el mercado globalizado. *Revista Apuntes del CENES*, 30(51), 165-182.
- Camarena, A. y Díaz, D. (2021). Análisis comparativo de la resistencia a la compresión, flexión y trabajabilidad del concreto tradicional versus un concreto utilizando escoria de acero como agregado fino. *Revista Gaceta Técnica*, 23(1), 20-34.
- Cárdenas, J. A., Cely, N. J. y Martínez, L. E. (2022). *Control técnico para mezclas de concreto hidráulico*. San José de Cúcuta: Universidad Francisco de Paula Santander, Ecoe Ediciones, 96 p.

- Castellano, J. M. y Carreño, A. R. (2013). Proyectos de investigación aplicada para el desarrollo de competencias en estudiantes de ingeniería. *El Hombre y la Máquina*, (42-43), 73-78. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/478/47829722011.pdf>
- Castellanos, P. (2024, 11 de marzo). Alerta en la industria del acero en Colombia por comercio desleal. *Metalmecánica*. Consultado el 20 de julio de 2024. Disponible en: <https://www.metalmecanica.com/es/noticias/alerta-en-la-industria-del-acero-en-colombia-por-comercio-desleal>
- Castillo, A. (2011). Diseño de mezclas de concreto hidráulico con el método ACI aplicado en pavimentos rígidos [Trabajo de grado, Ingeniería Civil]. *Biblioteca Virtual Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*. Disponible en: http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/7219/FIC-L-2011-0413.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- CEMEX Colombia S.A. (2020). Pavimentos MR Tipo IDU. Disponible en: <https://www.cemexcolombia.com/documents/45752949/49991047/ficha-mr-idu.pdf/141f561d-4a4f-9091-becb-371984c69c28>
- Comando Construcciones (2024, 3 de enero). La industria siderúrgica colombiana desafíos y oportunidades. *Construcciones*. Consultado el 30 de abril de 2024. Disponible en: <https://www.comandoconstrucciones.com/la-industria-siderurgica-colombiana-desafios-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. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.142>

- Domínguez, A. y Ferraro, F. (2020). Resistencia a la compresión de un concreto $f'_c=210$ kg/cm² con sustitución del agregado grueso por escoria de acería de horno de arco eléctrico [Tesis de grado, Ingeniería Civil]. Universidad de San Pedro, Perú. Disponible en: <https://repositorio.usanpedro.edu.pe/server/api/core/bitstreams/b3b8e70e-c111-4e17-922f-72377bc45925/content>
- Esteban, N. (2018). Tipos de investigación. Repositorio Institucional USDG. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/250080756.pdf>
- Falcon, L. L. (2022). Propiedades físicas y mecánicas del concreto hidráulico modificados con mucílago de huaraco en zonas altoandinas, Huancayo, Junín 2021 [Trabajo de grado, Ingeniería Civil]. *Repositorio Institucional de la Universidad Continental*. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/11791>
- Faleschini, F., Alejandro Fernández-Ruiz, M., Zanini, M. A., Brunelli, K., Pellegrino, C., & Hernández-Montes, E. (2015). High performance concrete with electric arc furnace slag as aggregate: Mechanical and durability properties. *Construction and Building Materials*, 101, 113–121. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.022>
- Frómeta, Z. P. y Delás, F. (2009). Influencia del carbono en las propiedades del acero para refuerzo de hormigón. *Tecnología Química*, 29, 60-69.
- González-Ortega, M. A., Cavalaro, S. H. P., Rodríguez de Sensale, G., & Aguado, A. (2019). Durability of concrete with electric arc furnace slag aggregate. *Construction and Building Materials*, 217, 543–556. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.082>

- Guevara, G., Hidalgo, C., Pizarro, M., Rodríguez, I., Rojas, L. D., y Segura, G. (2011). Efecto de la variación agua/cemento en el concreto. *Tecnología en Marcha*, 25(2), 80-86.
- Gutiérrez, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 231 p.
- Gutiérrez, E., Fuquen, H., y Abril, D. (2010). Planificación integrada de producción y distribución para un conglomerado industrial. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, (53), 88-105.
- Gutiérrez, M. (2023). Diseño y construcción de un horno de arco eléctrico para fusión de metales [Trabajo de Fin de Grado, Ingeniería en Tecnologías Industriales]. Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en: https://oa.upm.es/75906/1/TFG_MANUEL_GUTIERREZ_FIDALGO.pdf
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC] (2018). NTC 174. Concretos. Especificación de los agregados para concretos.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC] (2023). Boletín de Vigilancia Estratégica Sector Construcción. *E-vigía*. Consultado el 30 de abril de 2024. Disponible en: <https://www.icontec.org/wp-content/uploads/2023/03/Boletin-Construccion-2023.pdf>
- Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto [IMCYC] (2004). Capítulo 2. Propiedades del concreto. En: Conceptos básicos del concreto. Ciudad de México. Disponible en: <https://www.imcyc.com/cyt/julio04/CONCEPTOS.pdf>

Instituto Nacional de Vías [INVIAS] (2012). Especificaciones generales de construcción.

Disponible en: <https://gerconcesion.co/invias2013/>

Jiménez, F. (2021). Modelo de un horno de arco eléctrico a través de ATPDRAW [Trabajo de grado, Ingeniería Mecánica y Eléctrica]. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Disponible en:

<https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/abc00db1-3f0f-47e2-956f-69ad032b1b27/content>

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C. y Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Portland Cement Association. Disponible en:

<https://ingenierosciviles.com.mx/Biblioteca/files/original/4e03b9ddedc81f98353a2e65478f0c50.pdf>

Martínez, E. D. (2015). Determinación de las proporciones de escoria de arco eléctrico (EAFS) para su uso en una mezcla de concreto estructural [Tesis, Ingeniería Civil].

Universidad Autónoma de Querétaro. Disponible en: <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/7276/1/RI001461.PDF>

Martínez, A. P. (2019). Diseño de pavimento rígido de la calle 7 entre carrera 7 y 5 del municipio de Puerto López, Meta [Trabajo de grado, Especialización Ingeniería de Pavimentos]. *Repositorio Universidad Militar Nueva Granada*. Disponible en:

<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/32237/MartinezFajardoAngelaPaola2019.pdf.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

- Mayor, N., Valderrama, J. A., Rojas, M. A., Benavides, H. M. y Prado, D. (2020). Uso de la Escoria de Horno de Arco Eléctrico (EHAЕ) como agregado fino para la producción de mortero estructural. *EIEI ACOFI*. Doi: <https://doi.org/10.26507/ponencia.830>
- Matallana, R. (2023). *El concreto. Fundamentos y nuevas tecnologías*. Corona, 266 p. Disponible en: <https://conconcreto.com/wp-content/uploads/2023/02/EL-CONCRETO-Fundamentos-y-nuevas-tecnologias..pdf>
- Miranda, R. J. (2010). Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos [Trabajo de grado, Ingeniería de Construcción]. *Universidad Austral de Chile*. Disponible en: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2010/bmfcim672d/doc/bmfcim672d.pdf>
- Molino, M. E. (2016). Gestión de los polvos de acería de horno eléctrico: revisión bibliográfica [Trabajo de Grado, Ingeniería Industrial con Especialidad en Química]. Universidad de Cantabria. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/9157/386973.pdf?sequence=1>
- Monje, C. A. (2011). *Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa. Guía didáctica*. Universidad Surcolombiana. Disponible en: <https://www.uv.mx/rmipe/files/2017/02/Guia-didactica-metodologia-de-la-investigacion.pdf>
- Morales, J. P. (2005). Técnicas de rehabilitación de pavimentos de concreto utilizando sobrecapas de refuerzo [Trabajo de grado, Ingeniería Civil]. Repositorio Institucional PIRHUA. Disponible en:

<https://pirhua.udep.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/939ab42a-fd28-41f9-b6a2-5aaad4e3a5d6/content>

Novoa, A. C. (2020). Estudio del uso de escoria como agregado grueso en mezclas asfálticas densas para pavimentos [Trabajo de especialización, Ingeniería de Pavimentos]. Universidad Católica de Colombia. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/0b473d64-2ba3-4736-aa5c-de6f065bf771/content>

Orrego, O. (2015). Desarrollo sostenible en la industria siderúrgica colombiana: visiones, principios y prácticas [Trabajo de grado, Maestría en Estudios Interdisciplinarios de Desarrollo]. Universidad de los Andes. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/1166504e-8caa-458d-a55e-b62910e1227c/content>

Portafolio (2019, 20 de junio). *La chatarra, un mercado de alto valor*. Consultado el 6 de mayo de 2024. Disponible en: <https://www.portafolio.co/economia/la-chatarra-un-mercado-de-alto-valor-530831>

Porrero, J., Ramos, C., Grases, J. y Velazco, G.J. (2014). *Manual del concreto estructural. Conforme a la norma COVENIN 1753:03*. Caracas, Venezuela: PAG Marketing Soluciones. Disponible en: <https://pe56d.s3.amazonaws.com/p193k6ak6nqf8199a17uh1ukueue9.pdf>

Resolución 472 de 2017. Por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en actividades de Construcción y Demolición (RCD) y se dictan otras disposiciones. 5 de marzo de 2017. D.O. 50.166.

- Restrepo, C. A. y Taborda, J. F. (2017). El mercado colombiano del acero estructural en el contexto de la globalización. *Revista Ciencias Estratégicas*, 25(38), 339-359.
- Rojas-Manzano, M. A.; Otálvaro-Calle, I. F.; Pérez-Caicedo, J. A.; Benavides, H. M., y Ambriz-Fregoso, C. (2021). Uso de las escorias de horno de arco eléctrico (EHAE) en la construcción - estado del arte. *Rev. UIS Ing.*, 20(2), 53-64.
- Sánchez, H. M. (2016). Escorias negras de horno de arco eléctrico y sus aplicaciones en pavimentos. *Revista L'esprit Ingénieux*, 63-72. Disponible en: <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieux/article/view/1367/1266>
- Sanjuán, M. A. y Chinchón, S. (2014). *Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland*. San Vicente del Raspeig: Publicaciones de la Universidad de Alicante, 181 p.
- Santos, C. L., Leao, B., dos Santos, G. C., Andrade, P. H. & Cecche, R. C. (2019). Use of electric arc furnace slag for producing concrete paving blocks. *Ambient. Constr.*, 19(2). Doi: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000200305>
- Suárez, L. C. (2018). Evaluación de escorias siderúrgicas de horno de arco eléctrico en mezclas de concreto estructural [Tesis de maestría, Ingeniería Civil]. Universidad de los Andes. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/35e66b72-3ba9-4549-b98b-e73e196a9263/content>
- Tamayo, P., Pacheco, J., Thomas, 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). Doi:
<https://doi.org/10.3390/app10010216>

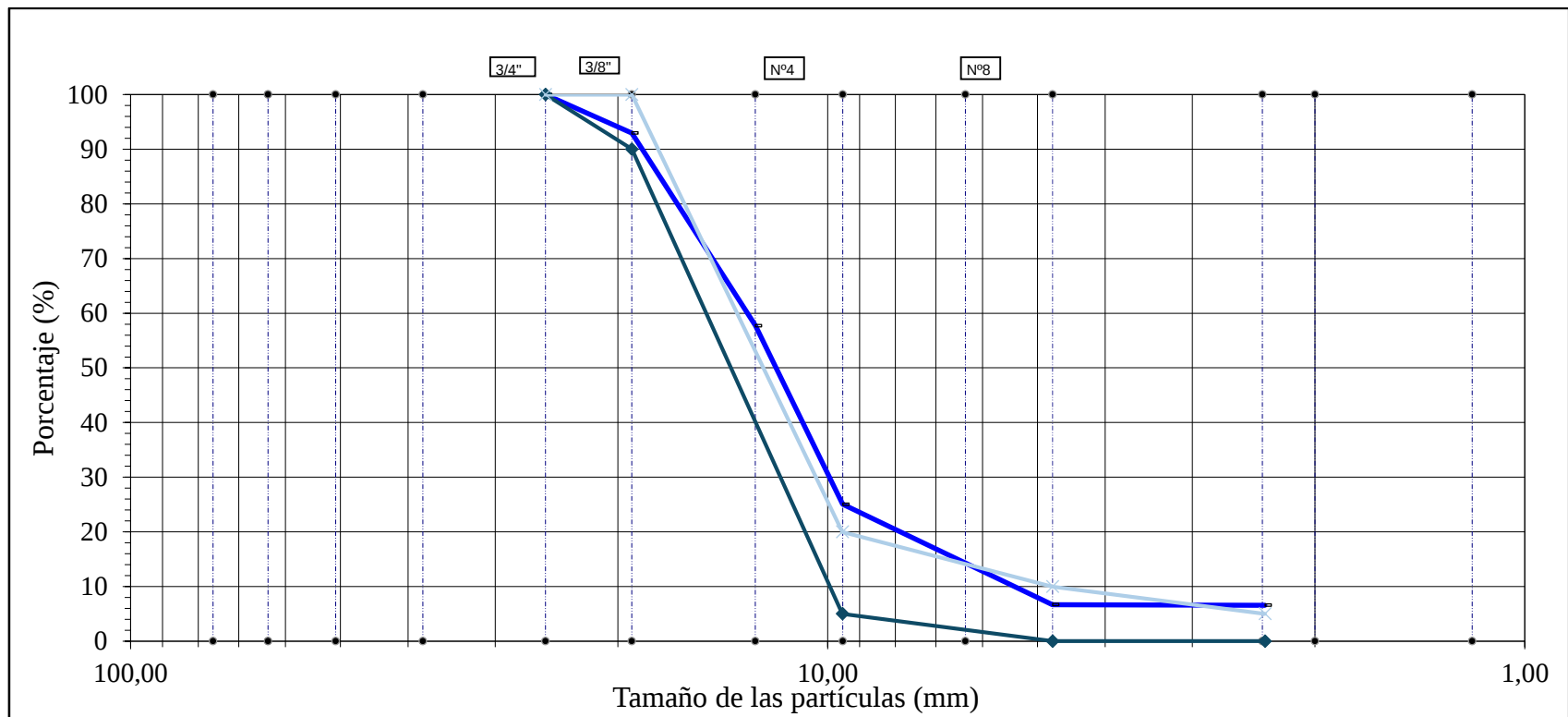
Toro, C. (2016). La infraestructura y el acero: motores de desarrollo nacional. *Revista A*, 66-69. Disponible en: https://www.andi.com.co/Uploads/2%20-%20Revista%20A_636536133099558842.pdf

Vargas, Z. R. (2009). La investigación aplicada: una forma de conocer las realidades con evidencia científica. *Educación*, 33(1), 155-165. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/440/44015082010.pdf>

Anexos

Anexo 1. Análisis granulométrico del triturado ¾" ponderado

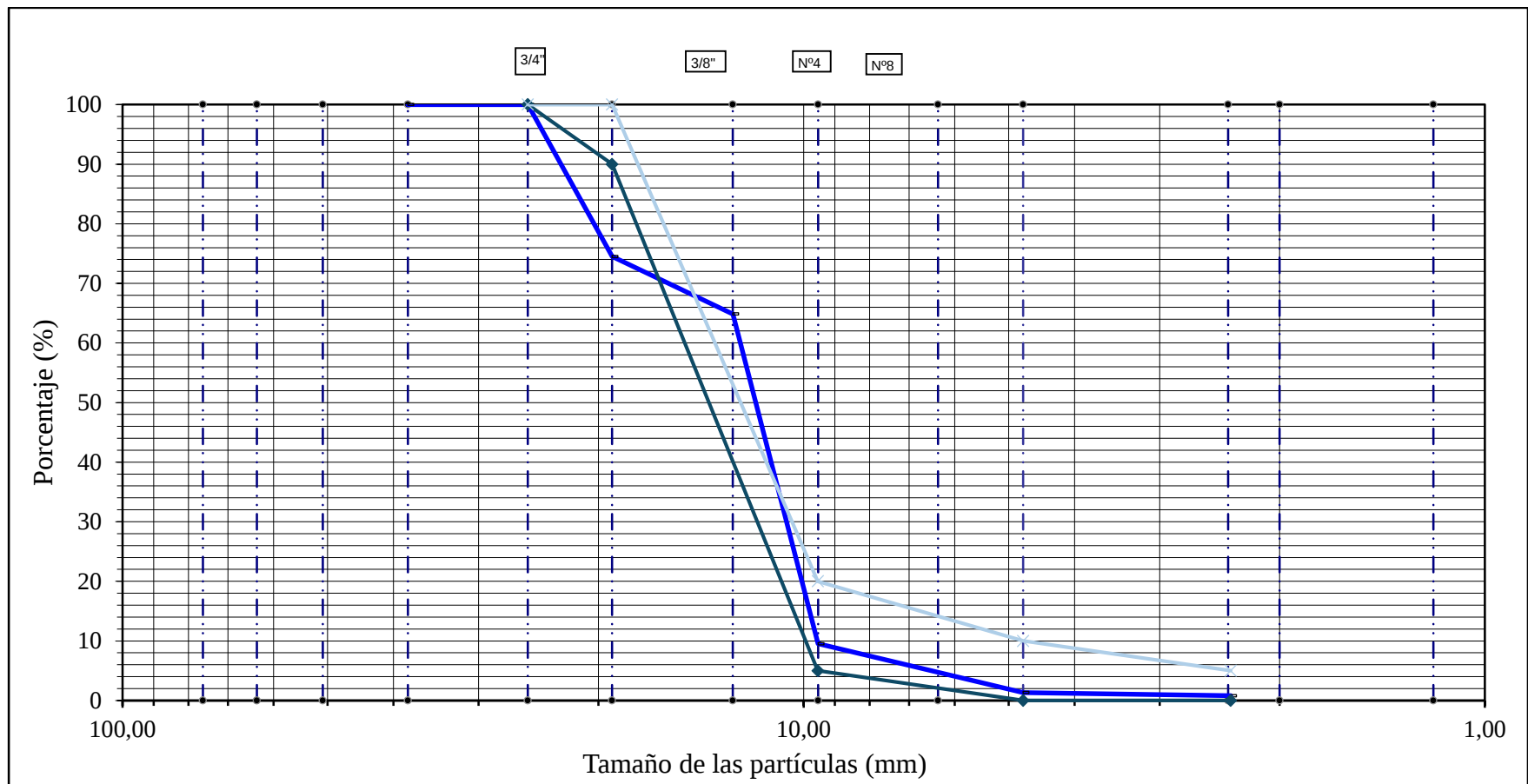
DATOS INICIALES					
Tipo de Material:	Triturado de 3/4"		Fecha de Realización:	10 de mayo de 2024	
Procedencia:	Nobsa	Agregado Grueso		DOC. INV-E-123 APLICABLE(S):	
Peso Inicial de la Muestra Seca:		2403,40 g	Peso de la Muestra Seca Después de Lavado:		g
TAMIZ N°	DIAMETRO (mm)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
1 1/2"	38,12	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,41	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,11	169,55	7,18	7,12	92,93
1/2"	12,74	846,76	35,24	42,32	57,72
3/8"	9,52	785,11	32,75	75,04	25,01
4	4,76	441,01	18,32	93,34	6,71
8	2,36	2,82	0,11	93,41	6,69
FONDO		158,22	6,61	100,00	0,00



%Grava=	93,42%
%Arena=	6,58%
% Finos=	0%

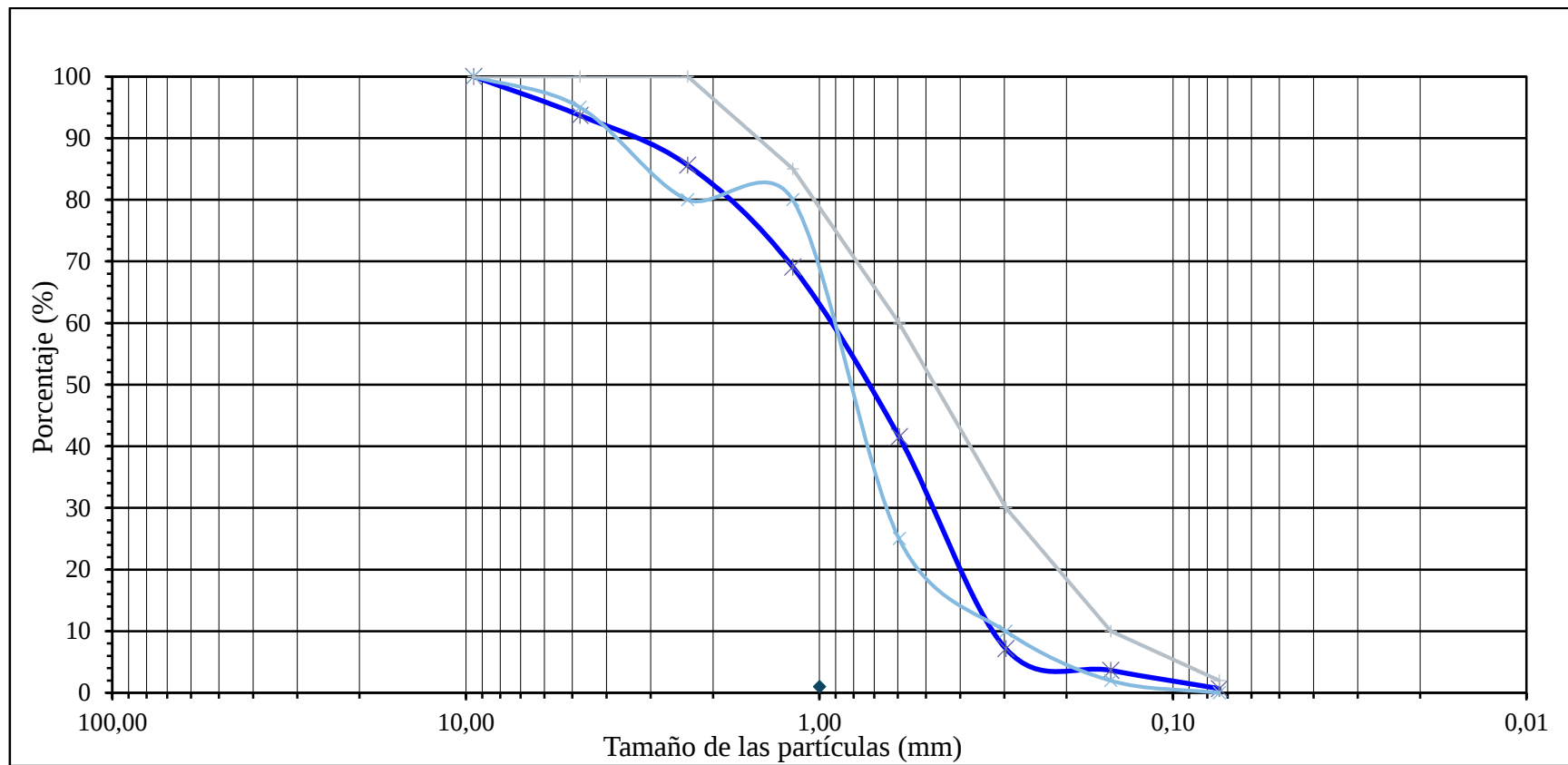
Anexo 2. Análisis granulométrico de la escoria negra, ponderado

DATOS INICIALES					
Tipo de Material:	Escoria Muestra N° 1	Fecha de Realización:	19 de marzo de 2024		
Procedencia:	Diacó	Agregado Grueso	DOC. APLICABLE(S):	INV-E-123	
Peso Inicial de la Muestra Seca:		5074,80 g	Peso de la Muestra Seca Después de Lavado:		0,0 g
TAMIZ N°	DIAMETRO mm	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
1 1/2"	38,11	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,42	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,15	1294,23	25,52	25,51	74,50
1/2"	12,71	488,91	9,63	35,12	64,90
3/8"	9,52	2809,00	55,41	90,52	9,50
4	4,76	415,40	8,21	98,71	1,30
8	2,36	27,21	0,52	99,23	0,80
Fondo		40,18	0,81	100,00	0,0



Anexo 3. Análisis granulométrico de la arena, ponderado

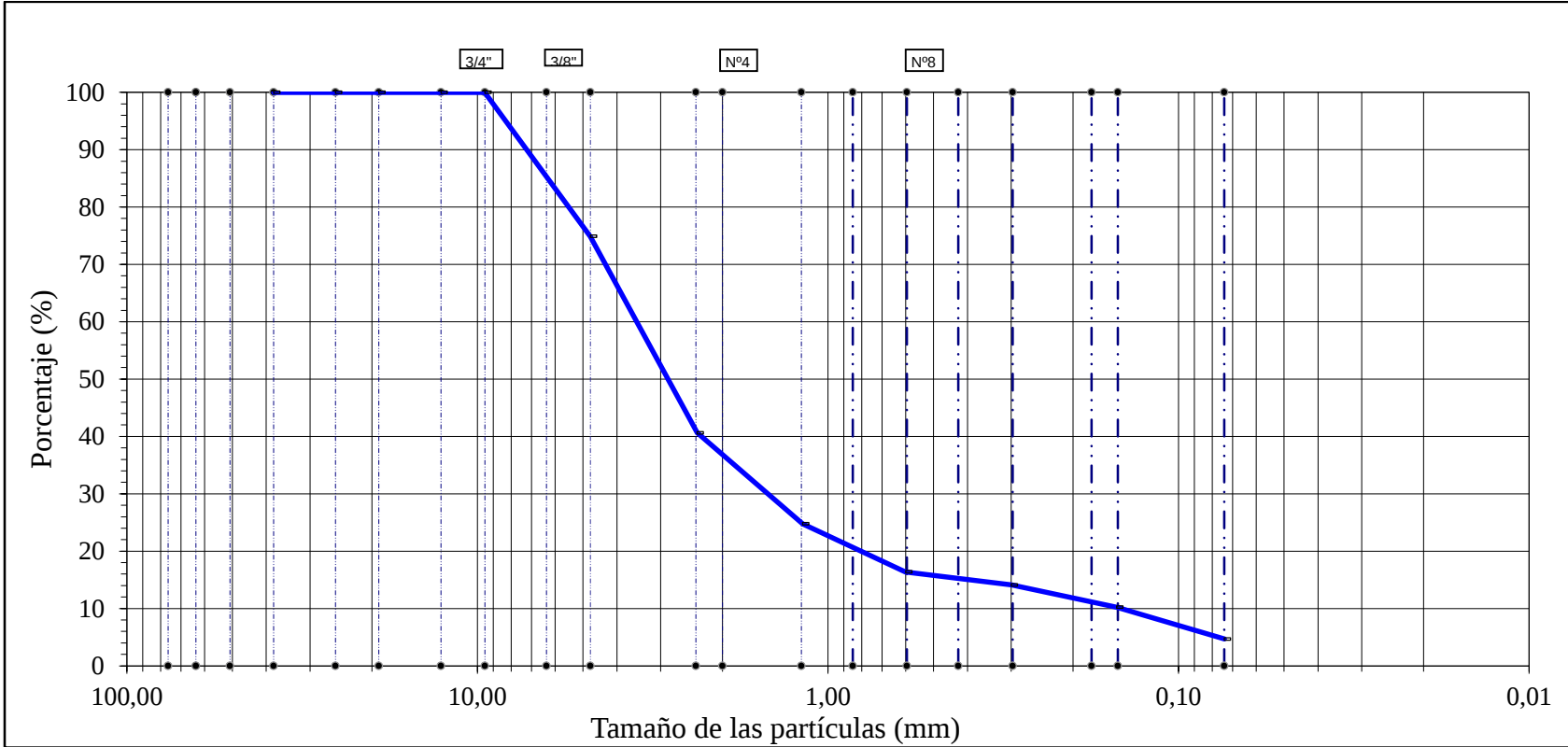
DATOS INICIALES					
Tipo de Material:	Arena		Fecha de Realización:	19 de marzo de 2024	
Procedencia:	Tunja	Agregado Grueso		DOC. APLICABLE(S):	INV-E-123
Peso Inicial de la Muestra Seca:		1033,50 g	Peso de la Muestra Seca Después de Lavado:		0,0 g
TAMIZ N°	DIAMETRO (mm)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
3/4"	19,1	0,00	0,00	0,00	100,0
1/2"	12,7	0,00	0,00	0,00	100,0
3/8"	9,52	0,00	0,00	0,00	100,0
4	4,76	65,32	6,30	6,30	93,70
8	2,36	83,43	8,10	14,40	85,60
16	1,19	170,75	16,50	30,90	69,10
30	0,59	284,78	27,50	58,50	41,50
50	0,29	355,34	34,40	92,80	7,20
100	0,15	36,63	3,50	96,40	3,60
200	0,07	30,53	3,00	99,30	0,70
FONDO		6,91	0,70	100,00	0,00



%Grava=	6%
%Arena=	93%
% Finos=	1%
Módulo de finura	3,0

Anexo 4. Análisis granulométrico de la grava, ponderado

DATOS INICIALES					
Tipo de Material:	Grava	Fecha de Realización:	19 de marzo de 2024		
Procedencia:	Tunja	Agregado Grueso	DOC. APLICABLE(S):	INV-E-123	
Peso Inicial de la Muestra Seca:		3052,10 g	Peso de la Muestra Seca Después de Lavado:		0,0 g
TAMIZ N°	DIAMETRO (mm)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,1	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,7	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,5	0,00	0,00	0,00	100,00
4	4,8	766,61	25,10	25,10	74,90
8	2,4	1045,42	34,30	59,40	40,60
16	1,2	483,94	15,90	75,20	24,80
30	0,6	256,32	8,40	83,60	16,40
50	0,3	69,54	2,30	85,90	14,10
100	0,2	118,44	3,90	89,80	10,20
200	0,1	168,82	5,50	95,30	4,70
Fondo		143,21	4,70	100,00	0,00

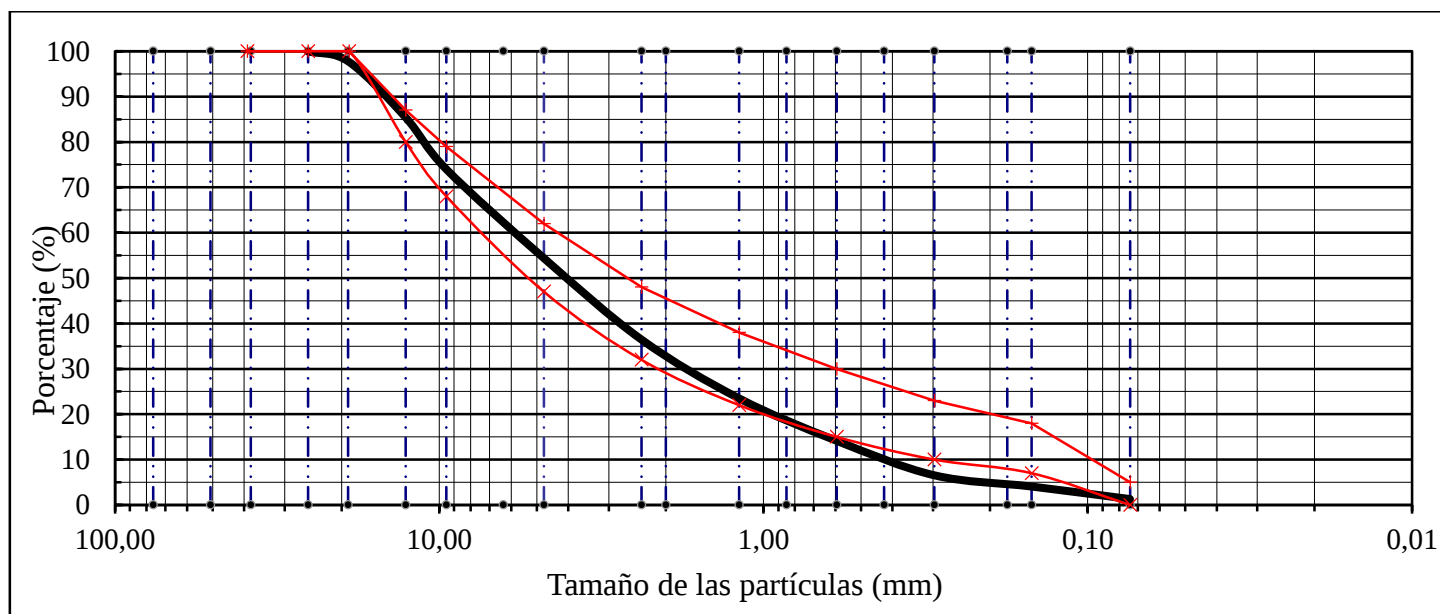


%Grava=	25%
%Arena=	75%
% Finos=	5%

Anexo 5. Diseño de mezcla

Fecha de Realización										19 de marzo de 2024		
Elección de la granulometría de la mezcla												
TM	Tamiz											
	1½"	1"	¾"	1/2"	3/8"	TAMIZ Nº 4	TAMIZ Nº 8	TAMIZ Nº 16	TAMIZ Nº 30	TAMIZ Nº 50	TAMIZ Nº 100	TAMIZ Nº 200
	39,10	25,40	19,00	12,70	9,51	4,76	2,38	1,19	0,595	0,297	0,149	0,074
¾"	100	100	100	87	79	62	48	38	30	23	18	5
	100	100	100	80	68	47	32	22	15	10	7	0
1"	100	100	90	78	71	56	44	34	27	21	16	5
	100	100	85	68	58	40	27	19	13	9	6	0
1 1/2	100	87	79	68	62	48	38	30	23	18	14	5
	100	80	68	55	47	32	22	15	10	7	5	0
Diseño de concreto hidráulico para MR 3,00 MPa												
1. Agregados considerados												
Material	Tamaño del tamiz - % pasa											
	1"	¾"	1/2"	3/8"	4	8	16	30	50	100	200	
Triturado de ¾" Muestra Nº 1	100,00	93,41	58,51	25,81	7,00	7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Escoria Muestra Nº 1	100,00	74,52	64,62	8,95	0,81	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Arena	100,00	100,00	100,00	100,00	93,51	85,71	68,85	41,32	7,01	3,41	0,65	
Grava	100,00	100,00	100,00	100,00	74,08	37,66	21,74	13,24	11,54	7,66	2,74	

% en la mezcla												
Tamaño Del tamiz	% Usado	Tamaño del tamiz - % Pasa										
		1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº 4	Nº 8	Nº 16	Nº 30	Nº 50	Nº 100	Nº 200
Triturado de 3/4" Muestra Nº 1	35,0%	35,00	32,70	20,50	9,00	2,50	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Escoria Muestra Nº 1	0,0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Arena	20,0%	20,00	20,00	20,00	20,00	18,71	17,12	13,81	8,34	1,45	0,74	0,11
Grava	45,0%	45,00	45,00	45,00	45,00	33,32	16,94	9,85	5,96	5,21	3,41	1,24
	100%											
TOTAL MEZCLA		100,00	97,77	85,53	74,01	54,54	36,55	23,54	14,21	6,67	4,11	1,35



Material	Peso (Kg) para 1m3 de concreto	Peso (Kg) para 1m3 de concreto	Peso Específico (Kg/m³)	Volumen absoluto (m³) de concreto	Proporción Peso/Kg de Cemento	Volumen suelto (m³) de concreto	Volumen suelto y bultos de cemento (m³) de concreto	Volumen suelto de cemento (Litros)	Baldes de 10 L para/m³ de concreto	Baldes de 10 L bulto de cemento
Agua	210	345	1000	0,34	0,74	0,34	0,34	37,10	34	3,70
Cemento	464,41	464,40	3110	0,14	1,00	0,38	9,30 bultos	1 bulto	37	4,01
Arena	318,92	318,90	1867	0,17	0,68	0,22	0,22	24,15	22	2,45
Escoria Muestra N° 1	0,00	0,00	3182	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Triturado de 3/4" Muestra N° 1	558,10	558,10	2623	0,21	1,20	0,42	0,42	45,63	42	4,61
Grava	717,50	717,50	2688	0,26	1,54	0,54	0,54	58,67	54	5,90
Total	1551	1341		0,91		1,38			136	15

Anexo 6. Determinación de masas unitarias para la grava

Tipo de Material	Grava	Fecha de Realización		20 de marzo de 2024
Procedencia	Tunja	Agregado grueso		
Determinación de masas unitarias				
Masa unitaria suelta				
Ensayo		1	2	3
Molde N°		1	1	1
Peso Molde + muestra	g	19948,95	20238,92	20170,91
Peso Molde	g	0,00	0,00	0,00
Peso muestra	0	19254,23	19534,11	19468,55
Peso muestra	lb.	42,55	43,12	42,91
Volumen muestra	pie ³ .	0,34	0,34	0,34
Masa Unitaria Suelto	lb/pie ³ .	122,47	124,25	123,83
Masa Unitaria Suelto	g/cm ³ .	1,96	1,99	1,98
Promedio M.U.S.	lb/pie ³ .	123,52		
Promedio M.U.S.	g/cm ³ .	1,97		

Nota: Datos en negrilla utilizados en cálculo de cantidades de material.

% Agregado Grueso en la Gradación:	100%
% Agregado Fino Gradación:	0%
Peso específico aparente:	2,61
Peso específico aparente (s.s.s):	2,66
Peso específico nominal:	2,74
Absorción:	1,79

Anexo 7. Peso específico y absorción de agregados gruesos, grava

DATOS INICIALES			
Tipo de Material	Grava	Fecha de Realización:	19 de marzo de 2024
Procedencia:	Nobsa	Agregado Grueso	DOC. APLICABLE(S): INV-E-223
PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DE AGREGADO GRUESO Y FINO			
MUESTRA N°	1	2	Promedio
A.- Peso en el aire de la muestra seca, en g.	1407,44	1407,45	1407,42
B.- Peso en el aire muestra saturada, superficie seca al aire, g..	1432,72	1432,78	1432,77
C.- peso muestra saturada sumergida en agua (g).	894,26	894,25	894,21
Peso específico aparente = $a / (b - c)$	2,61	2,61	2,61
Peso específico aparente saturada con superficie seca = $b / (b - c)$	2,66	2,66	2,66
Peso específico nominal = $a / (a - c)$	2,74	2,74	2,74
Absorción = $(b - a) / a \times 100 \%$	1,79	1,79	1,79

Anexo 8. Determinación de masas unitarias triturados

Tipo de Material		Triturado	Fecha de Realización		20 de marzo de 2024	
Procedencia		Tunja	Agregado grueso			
Determinación de masas unitarias						
Masa unitaria suelta						
Ensayo		1	2	3		
Molde N°		1	1	1		
Peso Molde + muestra	g	18040,00	17600,00	17720,00		
Peso Molde	g	4400,00	4400,00	4400,00		
Peso muestra	g	13165,00	12740,30	12856,10		
Peso muestra	lb.	29,00	28,12	28,31		
Volumen muestra	pie³.	0,34	0,34	0,34		
Masa Unitaria Suelto	lb/pie³.	83,74	81,04	81,78		
Masa Unitaria Suelto	g/cm³.	1,34	1,29	1,31		
Promedio M.U.S.	lb/pie³.	82,18				
Promedio M.U.S.	g/cm³.	1,31				
Masa unitaria compacta						
Ensayo						
Molde N°		2	2	2		
Peso Molde + muestra	g	18800,00	18700,00	18750,00		
Peso Molde	g	4400,00	4400,00	4400,00		
Peso muestra	g	14400,00	14300,00	14350,00		
Peso muestra	lb.	31,71	31,51	31,63		
Volumen muestra	pie³.	0,34	0,34	0,34	0,34	
Masa Unitaria Compacta	lb/pie³.	91,39	90,75	91,07		
Masa Unitaria Compacta	g/cm³.	1,46	1,45	1,45		
Promedio M.U.C.	lb/pie³.	91,07				
Promedio M.U.C.	g/cm³.	1,45				

Nota: Datos en negrilla utilizados en cálculo de cantidades de material.

Anexo 9. Peso específico y absorción de agregados gruesos y finos, triturado $\frac{3}{4}$

DATOS INICIALES			
Tipo de Material	Triturado de 3/4"	Fecha de Realización:	19 de marzo de 2024
Procedencia:	Nobsa	Agregado Grueso	DOC. APLICABLE(S): INV-E-223
PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DE AGREGADO GRUESO Y FINO			
MUESTRA N°	1	2	Promedio
A.- Peso en el aire de la muestra seca, en g.	3630,12	4102,31	3866,21
B.- Peso en el aire muestra saturada, superficie seca al aire, g..	3679,18	4168,35	3923,72
C.- Peso muestra saturada sumergida en agua, g..	2279,41	2576,22	2427,81
Peso específico aparente = $a / (b - c)$	2,59	2,57	2,58
Peso específico aparente saturada con superficie seca = $b / (b - c)$	2,62	2,61	2,62
Peso específico nominal = $a / (a - c)$	2,68	2,68	2,68
Absorción = $(b-a) / a \times 100 \%$	1,35	1,60	1,47

% Agregado Grueso En La Gradación:	100%
% Agregado Fino Gradación:	0%
Peso específico aparente:	2,58
Peso específico aparente (s.s.s):	2,62
Peso específico nominal:	2,68
Absorción:	1,47

Anexo 10. Determinación de masa unitaria para la escoria

Tipo de Material	Escoria	Fecha de Realización	20 de marzo de 2024		
Procedencia	Tunja	Agregado grueso			
Determinación de masas unitarias					
Masa unitaria suelta					
Ensayo		1	2	3	
Molde N°		1	1	1	
Peso Molde + muestra	G	18100,00	17920,00	18025,00	
Peso Molde	G	4400,00	4400,00	4400,00	
Peso muestra	G	13222,94	13049,22	13150,51	
Peso muestra	lb.	29,21	28,82	29,00	
Volumen muestra	pie³.	0,34	0,34	0,34	
Masa Unitaria Suelto	lb/pie³.	84,11	83,00	83,65	
Masa Unitaria Suelto	g/cm³.	1,34	1,33	1,34	
Promedio M.U.S.	lb/pie³.	83,59			
Promedio M.U.S.	g/cm³.	1,33			
Masa unitaria compacta					
Ensayo					
Molde N°		2	2	2	
Peso Molde + muestra	gr.	18920,00	19180,00	19050,00	
Peso Molde	gr.	4400,00	4400,00	4400,00	
Peso muestra	gr.	14520,00	14780,00	14650,00	
Peso muestra	lb.	31,91	32,51	32,21	
Volumen muestra	pie³.	0,34	0,34	0,34	0,34
Masa Unitaria Compacta	lb/pie³.	92,15	93,80	92,97	
Masa Unitaria Compacta	g/cm³.	1,47	1,50	1,49	
Promedio M.U.C.	lb/pie³.	92,97			
Promedio M.U.C.	g/cm³.	1,49			

Nota: Datos en negrilla utilizados en cálculo de cantidades de material.

Anexo 11. Peso específico y absorción de agregados gruesos y finos escoria

DATOS INICIALES			
Tipo de Material	Escoria	Fecha de Realización:	19 de marzo de 2024
Procedencia:	Nobsa	Agregado Grueso	DOC. APLICABLE(S): INV-E-223
PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DE AGREGADO GRUESO Y FINO			
MUESTRA N°	1	2	Promedio
A.- Peso en el aire de la muestra seca, en g.	2020,41	2008,43	2014,42
B.- Peso en el aire muestra saturada, superficie seca al aire, g..	2055,11	2040,11	2047,65
C.- Peso muestra saturada sumergida en agua, g..	1412,32	1395,81	1404,05
Peso específico aparente = $a / (b - c)$	3,14	3,11	3,13
Peso específico aparente saturada con superficie seca = $b / (b - c)$	3,19	3,16	3,18
Peso específico nominal = $a / (a - c)$	3,32	3,27	3,30
Absorción = $(b - a) / a \times 100 \%$	1,71	1,57	1,64

% Agregado grueso en la gradación:	100%
% agregado fino gradación:	0%
Peso específico aparente:	3,13
Peso específico aparente (s.s.s):	3,18
Peso específico nominal:	3,30
Absorción:	1,64

Anexo 12. Determinación de masa unitaria para la arena

Tipo de Material		Arena	Fecha de Realización		20 de marzo de 2024	
Procedencia		Tunja	Agregado fino			
Determinación de masas unitarias						
Masa unitaria suelta						
Ensayo		1	2	3		
Molde N°		1	1	1		
Peso Molde + muestra	g	5966,00	5954,00	5960,00		
Peso Molde	g	1520,00	1520,00	1520,00		
Peso muestra	g	4291,21	4279,64	4285,40		
Peso muestra	lb.	9,53	9,41	9,41		
Volumen muestra	pie³.	0,10	0,10	0,10		
Masa Unitaria Suelto	lb/pie³.	88,85	88,61	88,73		
Masa Unitaria Suelto	g/cm³.	1,42	1,42	1,42		
Promedio M.U.S.	lb/pie³.	88,73				
Promedio M.U.S.	g/cm³.	1,42				
Masa unitaria compacta						
Ensayo						
Molde N°		2	2	2		
Peso Molde + muestra	g	6372,00	6424,00	6390,00		
Peso Molde	g	1520,00	1520,00	1520,00		
Peso muestra	g	4852,00	4904,00	4870,00		
Peso muestra	lb.	10,71	10,82	10,71		
Volumen muestra	pie³.	0,10	0,10	0,10		
Masa Unitaria Compacta	lb/pie³.	100,24	101,31	100,61		
Masa Unitaria Compacta	g/cm³.	1,60	1,62	1,61		
Promedio M.U.C.	lb/pie³.	100,72				
Promedio M.U.C.	g/cm³.	1,61				

Nota: Datos en negrilla utilizados en cálculo de cantidades de material.

Anexo 13. Peso específico y absorción de agregados gruesos y finos arena

DATOS INICIALES			
------------------------	--	--	--

Tipo de Material	Arena	Fecha de Realización:	19 de marzo de 2024
------------------	-------	-----------------------	---------------------

Procedencia:	Tunja	Agregado Fino	DOC. APLICABLE(S): INV-E-222
--------------	-------	---------------	------------------------------

PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DE AGREGADO GRUESO Y FINO			
--	--	--	--

MUESTRA N°	1	2	Promedio
A.- Peso en el aire de la muestra seca, en g.	500,92	500,92	500,93
B.- Peso del picnómetro aforado lleno de agua, en g.	679,71	679,75	679,74
C.- Peso total del picnómetro aforado+muestra+agua, en g.	910	910	910
D.- Peso de la muestra saturada con superficie seca, en g.	495,82	495,86	495,81
Peso específico aparente = $a / (b - c)$	1,88	1,88	1,88
Peso específico aparente saturada con superficie seca = $b / (b - c)$	1,86	1,86	1,86
Peso específico nominal = $a / (a - c)$	1,85	1,85	1,85
Absorción = $(b - a) / a \times 100 \%$	35,69	35,69	35,69

% Agregado Grueso en la Gradación:	100%
% Agregado Fino Gradación:	100%
Peso específico aparente:	1,88
Peso específico aparente (s.s.s):	1,86
Peso específico nominal:	1,85
Absorción:	35,69

Anexo 14. Caras fracturadas del triturado

DATOS INICIALES				
Tipo de Material	Triturado de 3/4"		Fecha de Realización:	19 de marzo de 2024
Procedencia:	Nobsa	Agregado Grueso		DOC. APLICABLE(S): INV-E-218
CARAS FRACTURADAS				
Tamiz	W Retiene	1 cara	2 o más	No Fracturado
1	0	-	-	-
0,75	67,61	-	67,61	-
0,5	1285,92	170,75	951,42	164,24
0,375	259,24	25,94	225,79	7,71
Nº 4	20,61	-	20,63	-

Anexo 15. Resistencia a la flexión para las muestras de concreto hidráulico con y sin escoria

Tipo de curado			Agua			Norma aplicada		INV-E 414		
Muestra	Escoria	Fecha Inicio	Fecha Ensayo	Edad Muestra (Días)	Resistencia a flexión (MPa)	Carga Aplicada (kN..)	Luz libre entre apoyos	Ancho Promedio	Altura Promedio	Módulo de rotura
N1	0%	25/04/2024	02/05/2024	7	1,62	11680	470	15,03	14,96	1630,21
			09/05/2024	14	1,88	13342	470	15,06	14,93	1866,32
			23/05/2024	28	2,01	14634	470	15,06	14,93	2047,11
N2	5%	25/04/2024	02/05/2024	7	1,79	12580	480	15,06	14,90	1805,24
			09/05/2024	14	2,16	15210	480	15,10	14,96	2158,55
			23/05/2024	28	2,27	15969	480	15,10	14,96	2266,22
N3	25%	26/04/2024	03/05/2024	7	1,49	10720	470	15,00	14,96	1499,51
			10/05/2024	14	2,09	15037	470	15,03	14,86	2127,04
			24/05/2024	28	2,15	15455	470	15,03	14,86	2186,25
N4	50%	02/05/2024	09/05/2024	7	2,10	15049	470	15,16	15,00	2072,76
			16/05/2024	14	2,28	16345	470	15,03	15,00	2271,14
			30/05/2024	28	2,96	21238	470	15,03	15,00	2951,01
N5	75%	02/05/2024	09/05/2024	7	2,24	15787	480	15,06	14,93	2255,32
			16/05/2024	14	2,91	20469	480	15,03	14,96	2917,64
			30/05/2024	28	3,01	21165	480	15,03	14,96	3016,93