Evaluación de la Adición de Escoria de Alto Horno en una Mezcla de Concreto de Peso Normal

Monica Fernanda Velandia Comesaquira
Jorge Andrés Amaya Clavijo

Universidad Distrital Francisco José De Caldas
Facultad Tecnológica
Ingeniería Civil
Bogotá D.C., 2024

Evaluación de la Adición de Escoria de Alto Horno en una Mezcla de Concreto de Peso Normal

Monica Fernanda Velandia Comesaquira
Cod. 20221579024

Jorge Andres Amaya Clavijo
Cod. 20221579003

Trabajo de grado en calidad de monografía presentado como requisito de grado para optar al título de ingeniero civil

Ing. Paulo Marcelo López Palomino
Director

Universidad Distrital Francisco José De Caldas
Facultad Tecnológica
Ingeniería Civil
Bogotá D.C., 2024

Notas de aceptación

Firma del jurado

Agradecimientos

En agradecimiento a nuestros compañeros partícipes del proyecto de grado y permitieron lograr el objetivo, a los docentes que sirvieron para desarrollar la propuesta y a los conocimientos proporcionados por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

A nuestro director de Tesis, Paulo Marcelo López, por su paciencia y apoyo. Sus conocimientos han sido fundamentales para culminar este proyecto.

A Gina Marcela Hincapié de la Universidad Nacional, por su colaboración con los ensayos químicos de la escoria de alto horno: ensayo espectro de infrarrojo y ensayo de fluorescencia de rayos X (XRF)

Dedicatoria

El presente trabajo lo dedicamos a nuestros padres, quienes nos apoyaron y acompañaron durante la etapa universitaria, por brindarnos una guía y ejemplo a seguir para el logro de nuestras metas y sueños.

A Dios, por ser nuestra guía y fortaleza en todo momento, por darnos el entendimiento para llegar hasta aquí.

A nuestros amigos, por compartir cada alegría y tristeza durante este viaje que se llama vida.

Contenido

Resumen **1**

Introducción **3**

Justificación **5**

Estado del Arte **8**

Problema de Investigación **20**

Objetivos **23**

Objetivo General 23
Objetivos Específicos 23

Marco Conceptual **24**

Concreto, Materia Prima y Propiedades 24
Cemento Hidráulico 25
Agua 26
Agregados o Áridos 26
Propiedades del Concreto en Estado Endurecido 27
Escoria de Alto Horno 29

Metodología **33**

Revisión Bibliográfica 33
Consecución de Materiales 34
Caracterización de Los Agregados 34
Material Grueso y Fino 35
Escoria de Alto Horno 43
Diseño de la Mezcla de Concreto 48
Establecer los Requisitos 48
Determinación de Proporciones 48
Diseño Preliminar, Ajuste y Optimización 49
Verificación de Desempeño y Documentación 49
Elaboración de Cilindros en Concreto 49
Definición de la Cantidad de Muestras 49
Preparación de Muestras 50
Curado del Concreto 50
Elaboración de Ensayos a Cilindros 51
Ensayo de Compresión 51

Desarrollo de la Propuesta **52**

Caracterización de los Materiales....52
Agregado Fino y Grueso....52
Escoria de Alto Horno....58
Diseño de la Mezcla de Concreto....63
Procedimiento Preliminar de Dosificación....64
Verificación Especificaciones Granulométricas....67
Determinación de Proporciones Mezcla Normal....70
Determinación de Proporciones Mezcla con Escoria....75
Mezcla de Concreto....78
Ensayo a la Compresión....80

Análisis de Resultados....84

Densidad y Resistencia del Concreto....84
Análisis Químicos de la Escoria....87

Conclusiones y Recomendaciones....91

Conclusiones....91
Recomendaciones....92

Limitaciones....93

Referencias....94

Anexos....100

Lista de tablas

Tabla 1. Comparación de resultados resistencia a la compresión 10

Tabla 2. Composición química de la escoria 31

Tabla 3. Ensayos para agregados en la mezcla de concreto 35

Tabla 4. Tamaño de la muestra agregado grueso para granulometría. 36

Tabla 5. Límites granulométricos agregado fino 37

Tabla 6. Límites granulométricos agregado grueso.....38

Tabla 7. Capacidad de los moldes ensayo de masa unitaria 42

Tabla 8. Características generales para diseño de mezcla 52

Tabla 9. Datos ensayo de granulometría de la arena. 53

Tabla 10. Datos ensayo de granulometría agregado grueso. 53

Tabla 11. Datos ensayo densidad y absorción de la arena. 54

Tabla 12. Datos ensayo densidad y absorción grava. 55

Tabla 13. Datos ensayo de humedad de la grava. 55

Tabla 14. Datos ensayo de humedad de la arena. 55

Tabla 15. Datos ensayo de masa unitaria de la grava. 56

Tabla 16. Datos ensayo de masa unitaria de la arena. 56

Tabla 17. Resultados ensayo de peso específico 57

Tabla 18. Resumen de caracterización de la grava. 57

Tabla 19. Resumen de caracterización de la arena. 57

Tabla 20. Datos ensayo de granulometría de la escoria. 59

Tabla 21. Datos ensayo de absorción de la escoria. 60

Tabla 22. *Datos ensayo de densidad de la escoria.* 60

Tabla 23. Datos ensayo de masa unitaria de la escoria. 61

Tabla 24. Resultados de caracterización de la escoria. 62

Tabla 25. Resultados ensayo de fluorescencia de rayos x 63

Tabla 26. Datos preliminares diseño de mezcla 67

Tabla 27. Verificación limites agregado grueso según NTC 174. 67

Tabla 28. Verificación limites agregado fino (arena) según NTC 174. 68

Tabla 29. Verificación limites agregado fino (escoria), según NTC 174. 69

Tabla 30. Resumen previo de cantidades del diseño de mezcla. 72

Tabla 31. Diseño de mezcla para un metro cubico de concreto. 74

Tabla 32. Diseño de mezcla para un cilindro de concreto. 74

Tabla 33. Datos para estimación de agregados mezcla con escoria. 75

Tabla 34. Resumen previo de cantidades del diseño de mezcla con escoria. 75

Tabla 35. Datos por ajuste de humedad diseño con escoria. 76

Tabla 36. *Diseño de mezcla para un metro cubico de concreto con escoria.* 76

Tabla 37. Diseño de mezcla para un cilindro de concreto con escoria. 76

Tabla 38. Cantidades con el reemplazo de 5 % de escoria. 77

Tabla 39. Cantidades con el reemplazo de 10 % de escoria. 77

Tabla 40. Cantidades con el reemplazo de 15 % de escoria. 77

Tabla 41. Cantidades con el reemplazo de 20 % de escoria. 77

Tabla 42. Diámetros, masas, precarga y carga para cada cilindro 81

Tabla 43. Área, densidad y resistencia para cada cilindro y grupo 84

Lista de Figuras

Figura 1. Resultados de resistencia de compresión del concreto con escoria vs diseño esperado..9

Figura 2. Evolución de la resistencia a la compresión en el tiempo 11

Figura 3. Comparación de la penetración de agua y carbonatación en el concreto 12

Figura 4. Resultados de la adición y activación de la escoria en el concreto 13

Figura 5. Comparación de la resistencia y durabilidad del concreto 14

Figura 6. Comparación de resistencia a la compresión y módulo de rotura 15

Figura 7. Comparación del concreto con escoria y con ceniza volante 16

Figura 8. Resistencia de compresión a los 28 y 90 días - concreto con escoria y ceniza volante.17

Figura 9. Resistencia a la compresión y carbonatación especímenes con escoria y normales 18

Figura 10. Composición química de la escoria según varios autores 32

Figura 11. Diagrama de flujo de la metodología.....33

Figura 12. Límites granulométricos grava y arena NTC 174.....38

Figura 13. Escoria de alto horno 44

Figura 14. Ejemplo de espectro de infrarrojo y zonas de grupos funcionales 47

Figura 15. Ensayo de cono para humedad superficial de la arena 54

Figura 16. Escoria de alto horno triturada.....58

Figura 17. Ensayo de cono para humedad superficial de la escoria.....59

Figura 18. Ensayo de densidad de la escoria de alto horno. 60

Figura 19. Resultados espectroscopía de infrarrojos.....62

Figura 20. Tablas para la selección del asentamiento y contenido de agua 65

Figura 21. Tabla para la estimación del contenido de agua. 65

Figura 22. Tabla de relación entre F'c y a/c.....66

Figura 23. Curva granulométrica del agregado grueso 68

Figura 24. Curva granulométrica del agregado fino; arena.....69

Figura 25. Curva granulométrica del agregado fino; escoria.....70

Figura 26. Tabla volumen de grava por m3 de concreto.....71

Figura 27. Comparación cantidades de materiales en los diseños 78

Figura 28. Fundición de cilindros. 79

Figura 29. Tanque de curado y curado de los cilindros.....79

Figura 30. Cilindros para ensayo de resistencia a la compresión 80

Figura 31. Pesaje de cilindros. 81

Figura 32. Superficies de falla cilindros convencionales.....82

Figura 33. Superficies de falla cilindros con 5% de escoria 82

Figura 34. Superficies de falla cilindros con 20% de escoria 83

Figura 35. Gráfico de Densidad del concreto vs Porcentaje de escoria 85

Figura 36. Gráfico de Resistencia a la compresión vs Porcentaje de escoria 86

Figura 37. Gráfico ensayo Infrarrojo (IR): Escoria de alto horno.....87

Figura 38. Composición química de la escoria. 89

Figura 39. Diagrama ternario: Composición química relativa de la escoria.....89

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Densidad aparente agregado fino 40

Ecuación 2. Absorción agregado fino.....40

Ecuación 3. Densidad aparente del agregado grueso 41

Ecuación 4. Absorción del agregado grueso 41

Ecuación 5. Humedad de los agregados.....41

Ecuación 6. Masa unitaria de los agregados.....43

Ecuación 7. Densidad de la escoria de alto horno.....46

Ecuación 8. Contenido de cemento 66

Ecuación 9. Volumen de grava por unidad de volumen de concreto.....71

Ecuación 10. Volumen de partículas de agregado grueso por metro cubico de agregado grueso.71

Ecuación 11. Pesos húmedos de los agregados 72

Ecuación 12. Exceso o defecto de agua en los agregados.....73

Resumen

La tecnología del concreto dentro de la línea investigativa de la ingeniería civil genera el contexto bajo el cual, empresas y profesionales han investigado las propiedades del concreto, por tanto, el desarrollo de investigaciones enfocadas a la optimización de la mezcla de concreto ha atraído la búsqueda de alternativas de interés para múltiples estudios, de esta forma, en el desarrollo de la propuesta de investigación, se evaluará. la adición de escoria de alto horno en una mezcla de concreto de peso normal, entendiendo evaluación como el estudio de la resistencia a la compresión del concreto elaborado con el reemplazo de material granular fino por escoria de alto horno en las siguientes proporciones: 5%, 10%, 15% y 20%.

La investigación experimental de la propuesta se desarrolla con el fin de presentar una alternativa que permita mitigar el consumo de recursos naturales y el deterioro del medio ambiente, puesto que el desarrollo de ciudades y países a generado la necesidad de la producción excesiva de concreto a partir de materiales obtenidos de la explotación de canteras, además, no se aprovechan adecuadamente los residuos del proceso productivo de materiales de otras industrias, lo que genera mayor contaminación y deterioro del medio ambiente.

Ahora bien, el planteamiento metodológico se enfoca en la consecución de materiales, la caracterización de los agregados por medio de ensayos (densidad, granulometría, humedad, absorción y masa unitaria), incluyendo estudios de petrografía a la escoria (espectroscopia de infrarrojos y fluorescencia de rayos x), el diseño de la mezcla de concreto, la elaboración de cilindros y el ensayo de compresión, con lo que se obtienen resultados en donde se logra identificar que la adición de escoria como material fino no modifica sustancialmente la resistencia a la compresión, sin embargo, en el porcentaje del 10% de reemplazo aumenta aproximadamente un 10% la resistencia de diseño (21 MPa), adicionalmente, se encuentra que la densidad del concreto disminuye con el aumento en la cantidad de escoria.

De esta forma, los resultados obtenidos permiten comprobar la conveniencia de usar el residuo del proceso productivo del acero como agregado granular fino, en términos de la resistencia a la compresión, dado que la misma no se reduce. Por otra parte, se proporciona una base para el estudio de otras propiedades del concreto tales como la durabilidad.

Introducción

El presente trabajo de grado contiene el resultado de un estudio de tipo experimental, que buscó la evaluación de la resistencia a la compresión en mezclas de concreto de peso normal reemplazando el agregado fino por escoria de alto horno en diferentes proporciones (5%, 10%, 15% y 20%), con el fin de proporcionar una solución adecuada para mitigar el consumo de recursos naturales y el deterioro del medio ambiente. En este sentido, es necesario caracterizar los materiales, diseñar la mezcla de concreto, elaborar las mezclas y los cilindros de concreto, para finalmente estudiar la resistencia a la compresión del producto comparando el concreto convencional y el elaborado con escoria de alto horno en las proporciones ya mencionadas.

Considerando lo anterior, se realizaron los ensayos más representativos para el estudio y aquellos que se puedan desarrollar en las instalaciones de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, estos ensayos a los materiales son: granulometría, densidad, humedad, absorción y resistencia a la compresión de cilindros a los 28 días. La escoria de alto horno se caracterizó como un agregado fino dado que la porosidad del material en estado natural generaría mayor consumo de materiales, por tanto, se realizaron ensayos para determinar sus propiedades en función de la normatividad aplicable a una arena. Adicionalmente, se contó con el apoyo de los laboratorios de la Universidad Nacional para la caracterización petrográfica de la escoria de alto horno, con el fin de obtener resultados a través de equipos y procedimientos adecuados con los cuales cuenta dicha institución, que permitan conocer la composición química del material.

Como principal resultado se obtiene que la escoria se compone de compuestos del oxígeno con silicio, calcio y hierro de acuerdo con el ensayo de espectroscopia de infrarrojos y el ensayo de fluorescencia de rayos X, y al ser empleada como material fino en el concreto, no proporciona una variación significativa en la resistencia a la compresión. En la mayoría de los

casos se mantiene en promedio la resistencia esperada de diseño, sin embargo, en el caso de los cilindros con el reemplazo del 10% se aumenta la resistencia esperada de diseño en un 10%, lo que implicaría una condición óptima para su empleabilidad en el desarrollo de mezclas de concreto con la escoria empleada para el presente estudio.

Justificación

El concreto como uno de los materiales empleados para la construcción de obras de infraestructura, es ampliamente usado por empresas e ingenieros dadas sus propiedades mecánicas y facilidad de uso en múltiples proyectos de ingeniería, además, con el paso del tiempo se ha logrado mejorar su propiedad de resistencia, gracias a estudios y mejoras en la materia prima que se emplea para su elaboración (cemento, aditivos y adiciones). Así, el concreto

> se ha convertido en el material de construcción más ampliamente utilizado a nivel mundial, en razón a su extraordinaria versatilidad en cuanto a las formas que se pueden obtener; sus propiedades físicas y mecánicas para ser usado como elemento estructural; y, su economía; razones que lo hacen muy competente frente a construcciones de madera, mampostería o acero. (Asocreto, 2010)

En ese sentido, el volumen de concreto fabricado anualmente para proyectos de ingeniería en Colombia es elevado, de acuerdo con las estadísticas del DANE, la producción de concreto premezclado para octubre de 2023 fue de 669.2 miles de metros cúbicos, lo que permitiría llenar más de 200 piscinas olímpicas. La fabricación de dicha cantidad de concreto implica que se requiere de gran cantidad de materia prima para la elaboración de este, lo que indica que la explotación en canteras es elevada y a su vez la destrucción de ecosistemas a fin de obtener grava y arena necesarias para elaborar el hormigón.

En vista de lo anterior, la preocupación mundial es buscar soluciones que disminuyan el impacto al medio ambiente y así sustentable y prolongada la vida del planeta y las especies que coexisten en él. Por tal motivo, en la industria de la construcción, una de las alternativas más prometedoras es la elaboración de concreto con el uso de la escoria como agregado, debido a que en varios estudios que se mencionaran posteriormente en este documento se han presentado

resultados positivos en cuanto a las propiedades y comportamiento del concreto como material de construcción.

El uso de escoria ayudaría a disminuir el consumo de los recursos naturales y así mismo, evitar un exceso en los desechos causados por actividades humanas, convirtiéndose en un insumo ideal para transformar al concreto en un producto ecológico. Cabe destacar que, como residuo del proceso productivo del acero y de distintos materiales conformados por el hierro, la escoria de alto horno ha sido empleada en los últimos años para diversos aspectos en la construcción tales como: la fabricación de cementos, concretos, tejas, ladrillos, entre otros.

Tal es el caso del trabajo de integración curricular de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, en el cual Tomalá Palma & Pozo Reyes (2022). encontraron que:

> Referente a la resistencia a compresión obtenido en las probetas fabricadas con cemento Portland GU, arena negra (El Triunfo) y como agregado grueso la escoria siderúrgica en los diseños f'c = 210, 240 y 280 kg/cm2 a una edad de 28 días, obtuvimos valores de 262,99 kg/cm2, 281,44 kg/cm2 y 315,04 kg/cm2 respectivamente

Se demuestra entonces que el reemplazo del material, para el caso específico citado anteriormente, ofrece mejoras en la resistencia del concreto, de este modo la escoria de alto horno se puede convertir en uno de los agregados adecuados, dado que este puede proporcionar aumento en la resistencia a la compresión y podría mejorar las propiedades en el concreto; factores que se buscan determinar en el desarrollo de la propuesta a través del desarrollo de cilindros de concreto, la caracterización química y mecánica de los materiales y ensayos que permitan determinar la resistencia a la compresión del concreto elaborado con escoria de alto horno.

Ahora bien, de acuerdo con Villaquirán Caicedo, Eduard, & Camilo (2023), pese a que "culturalmente se tiene la concepción de que los productos realizados con materia prima

alternativa no resultan capaces de soportar los mismos usos a los fabricados con materia prima virgen”, se deben buscar y contemplar alternativas, que se encuentren respaldadas por la verificación de las mejoras que trae consigo cierta solución, puesto que permite perfeccionar los modelos sociales y económicos, además de un crecimiento y desarrollo adecuados en cuanto al cuidado del medio ambiente.

Por lo anterior, se debe considerar el proceso de obtención de los materiales y la composición química, pues puede variar entre una fábrica y otra, y entre lechadas diferentes de una misma empresa. Lo anterior implica que el comportamiento del concreto es susceptible a variar y se deberán estudiar las características del material de reemplazo en cada caso específico. Otro elemento para tener en cuenta en la elaboración de las mezclas y cilindros de concreto con reemplazo de material por escoria de alto horno corresponde al material granular que será reemplazado, si bien puede ser el agregado grueso o fino, la selección de uno u otro dependerá de factores económicos principalmente.

Así, este trabajo de grado permitirá verificar la conveniencia de reemplazar materiales comunes del concreto por residuos de empresas metalúrgicas de Bogotá D.C., y así mismo, se pretende determinar la mejor opción de reemplazo de material (escoria de alto horno) y la proporción en la que mejor se ajusta la mezcla para obtener resultados similares a los obtenidos en el estudio citado, donde se obtiene una mejora en la resistencia a la compresión. Así, se parte de la hipótesis que el reemplazo de material granular por escoria de alto horno en la mezcla de concreto trae consigo un aumento en la resistencia del concreto.

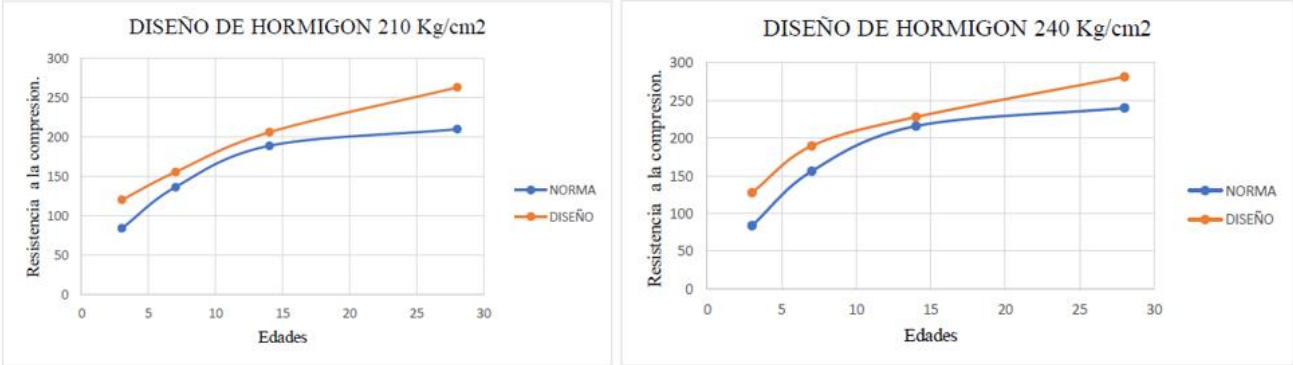
Estado del Arte

Dentro de las alternativas y en el ámbito del diseño de mezclas de concreto con reemplazo de material granular por escoria de alto horno se puede mencionar el trabajo de investigación denominado "Diseño de hormigones con cemento portland de resistencias f'c = 210, 240 y 280 kg/cm^2 con agregado grueso de escoria de acero de alto horno"; el desarrollo de la propuesta se basa en la búsqueda de alternativas de solución para conservar los recursos naturales e impedir el deterioro del paisaje, partiendo de la hipótesis que la resistencia del concreto elaborado con escoria de acero será mayor a la resistencia de diseño para una mezcla común.

En la propuesta se presenta la composición química de la escoria para la empresa ANDEC S.A., que se compone principalmente por Oxido de Calcio (CaO), Dióxido de Silicio (SiO_2) y Trióxido de Hierro (Fe_2O_3), con porcentajes de 34.5%, 29.4% y 11.9% respectivamente. Se caracterizó la escoria como agregado, determinando su granulometría y propiedades físicas, para posteriormente elaborar cilindros y vigas de concreto de acuerdo con el diseño establecido en el código ACI 211.1. Finalmente, se evaluó de forma experimental el comportamiento de mezclas de hormigón, donde el agregado grueso fue reemplazado en un 100% por escoria de la empresa ANCDEC S.A. de Ecuador, por medio de ensayos de resistencia a la compresión del concreto a los 28 días de edad.

De acuerdo con la **Figura *1*** y los resultados presentados en el estudio, se obtuvo una respuesta positiva en las propiedades de resistencia con valores entre 12% y 25% superiores a las esperadas en el diseño. En específico, se encuentra que se obtiene una mayor resistencia en el concreto de 210 kg/cm^2, generando una eficiencia de 25.2%, para los demás diseños y resistencias evaluadas en la propuesta se tienen mejoras en la resistencia con eficiencias hasta del 17%.

Figura 1. Resultados de resistencia de compresión del concreto con escoria vs diseño esperado



Fuente: *(Tomalá Palma & Pozo Reyes, 2022)*

Por otra parte, la investigación denominada "Análisis comparativo de la resistencia a la compresión, flexión y trabajabilidad del concreto tradicional versus un concreto utilizando escoria de acero como agregado fino", tuvo como objetivo determinar la influencia de la escoria como agregado fino en las propiedades del concreto de resistencia de 21MPa, reemplazando material en proporciones de 10%, 15% y 20% con el fin de proporcionar una alternativa amigable con el medio ambiente, toda vez que las empresas en Lima, Perú producen gran cantidad de material durante las actividades para la producción de acero.

Como resultado del análisis se demostró que a los 7, 14 y 28 días se produjo concreto con aspectos favorables cuando se reemplaza el 10% de material, pues se obtiene un diseño óptimo para el uso de escoria en tres parámetros principales estudiados en la investigación (rotura, desgaste y elasticidad), sin embargo, los demás porcentajes de reemplazo no produjeron una variación significativa entre la resistencia esperada y la resistencia de diseño, pese a que disminuyo con respecto al concreto convencional (Ver Tabla *1*). Adicionalmente, se evaluó la resistencia a la flexión para cada cilindro elaborado con los tres porcentajes de reemplazo y dicha característica o valor ha disminuido sustancialmente con respecto al valor esperado del diseño.

***Tabla* 1.** Comparación de resultados resistencia a la compresión

Tipo de diseño	Esfuerzo (kPa)	Tipo de diseño	Esfuerzo (kPa)
Diseño patrón	25399	Diseño con 15% escoria	22849
	24713		23340
	25105		22849
	25693		23144
Diseño 10% escoria	26576	Diseño con 20% escoria	19515
	26576		19613
	25574		20006
	26576		19515

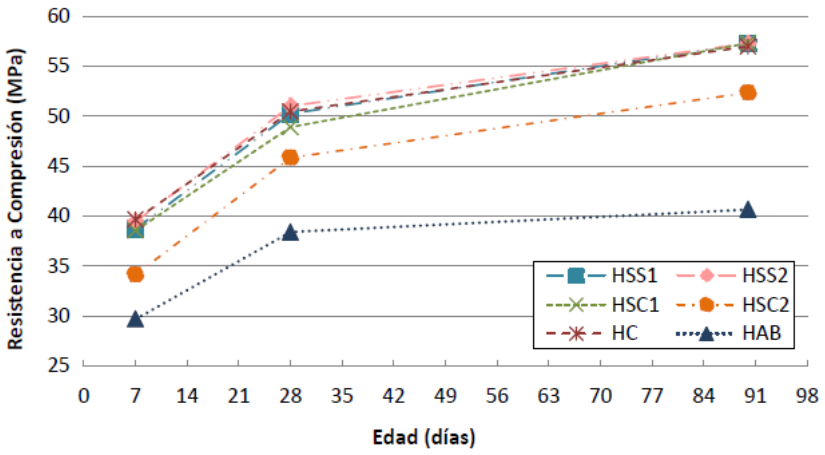
Fuente: Adaptado de *(Camarena Flores & Díaz Garamendi, 2022)*

En esa misma línea de investigación y basados en el impacto ambiental y la búsqueda de la sostenibilidad en el sector de la construcción, la autora González Ortega Martha, a través de la tesis doctoral denominada "Comportamiento y diseño de hormigones estructurales con áridos siderúrgicos EAF", presenta una alternativa para el diseño de mezclas de concreto convencional, por medio del uso de subproductos resultantes de la fabricación de acero, en donde, se destacan las propiedades de los residuos de la producción de acero, dentro de los que se encuentran: alta densidad, alta resistencia a la fragmentación, al desgaste y abrasión, convirtiendo al árido siderúrgico en un material interesante para la fabricación de hormigones que fomenten la búsqueda de sostenibilidad y la conservación de los recursos naturales.

Para la propuesta y de acuerdo con la autora, se caracterizan los materiales, toda vez que, las características físicas químicas y mecánicas de los áridos pueden variar en función de la procedencia o/y proceso de fabricación, uno de los aspectos analizados corresponde a la estabilidad volumétrica de la escoria, dado que la misma tiende a variar y se debe considerar dicho factor en la fabricación de concreto. Adicionalmente, cabe destacar que fue reemplazado en su totalidad el agregado grueso y un 80% del agregado fino en la elaboración de mezclas con escoria, para lo cual, en los ensayos de resistencia a la compresión se demuestran resultados

positivos, dentro de los cuales se destaca los aumentos entre 15 y 20MPa frente a un concreto fabricado con árido barítico y resistencias similares al concreto convencional (Ver **Figura *2***).

Figura 2. Evolución de la resistencia a la compresión en el tiempo

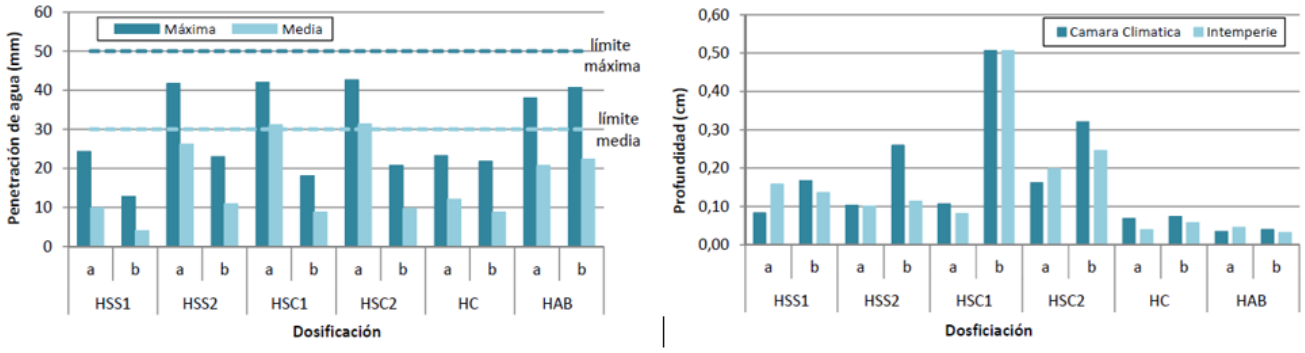


Fuente: *(González Ortega, 2015)*

De la figura anterior, es importante mencionar que, HSS hace referencia a hormigones siderúrgicos con arena silícea, HSC a concretos siderúrgicos con arena caliza, HC es el hormigón convencional, y HAB corresponde a los concretos con árido barítico.

En los ensayos de durabilidad del concreto, se destaca que se presentan efectos adversos que generan un impacto negativo en el concreto con escoria cuando se compara con el concreto convencional, para el estudio de la durabilidad, se realizaron estudios de carbonatación y penetración del agua, cuyos resultados muestran mayores penetraciones de agua y carbonatación en los cilindros e concreto fabricados con escoria, mientras que, en los concretos fabricados con materiales .comunes los efectos de penetración de agua y carbonatación son menores, tal como se muestran a continuación, en donde, la gráfica de la izquierda presenta los resultados de la penetración del agua, y la gráfica de la derecha muestra los resultados de la profundidad de la carbonatación.

Figura 3. Comparación de la penetración de agua y carbonatación en el concreto

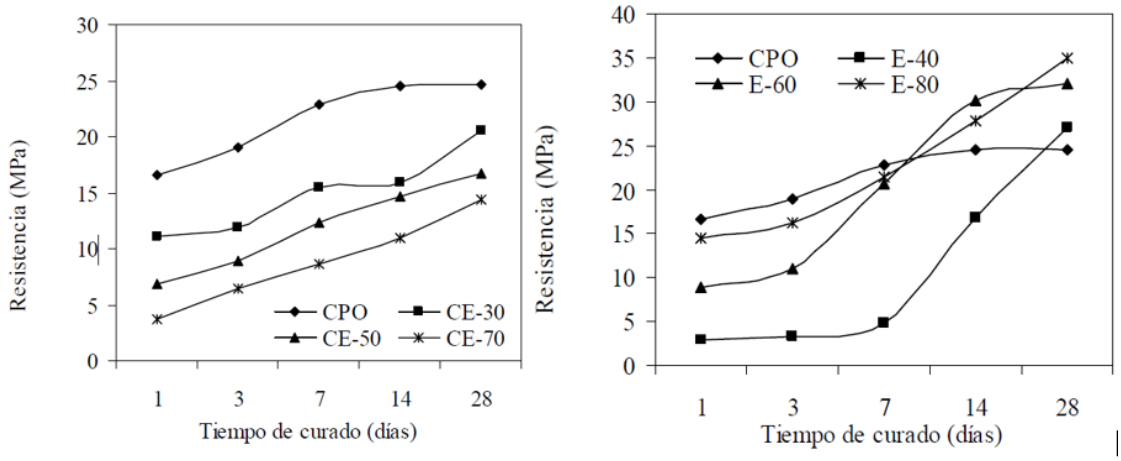


Fuente: *(González Ortega, 2015)*

Otro estudio de gran importancia fue realizado por L. Espinoza y I. Escalante, denominado "Comparación de las propiedades del concreto utilizando escoria de alto horno como reemplazo parcial o total del cemento Pórtland ordinario", a partir del cual se realizó una investigación con el concreto siguiendo la norma ACI 211.1, que para el caso del estudio, se enfocó en reemplazar el cemento convencional por escoria de alto horno de la empresa Altos Hornos de México, S.A. en proporciones del 30, 50, 70 y 100%, y se obtuvo como resultado una mejora en las propiedades mecánicas del concreto cuando se sustituyó el 100% del cemento, aunque no se obtuvo la misma respuesta en el caso del reemplazo parcial. Este artículo muestra que se ha estudiado la posibilidad de cambiar no solo el agregado, sino que también se ha buscado el reemplazo de otros materiales que hacen parte del concreto.

Las siguientes figuras, muestran los resultados de la resistencia a la compresión obtenida con el paso del tiempo para cada una de las probetas analizadas, donde COP hace referencia al concreto elaborado con cemento, CE los cilindros con escoria al 30%, 50% y 70%, y E a los cilindros con 100% de escoria como agente cementante y activada con 40%, 60% y 80% de Na_2O.

Figura 4. Resultados de la adición y activación de la escoria en el concreto



Fuente: *(Espinoza & Escalante, 2008)*

Para lograr reemplazar el cemento por escoria, fue necesario estudiar las propiedades y características químicas del material en la búsqueda que el mismo actuará de forma similar al cemento, así, se considera indispensable activar químicamente la escoria a través de un agente alcalino, con tal suerte que se produzcan reacciones de hidratación que formen nuevas faces cementosas. En este sentido, dentro de la investigación, se encuentra que a mayor concentración de agente alcalino (Na_2O), se producen en mayor cantidad productos de hidratación que densifican la matriz y aumentan la resistencia mecánica del concreto.

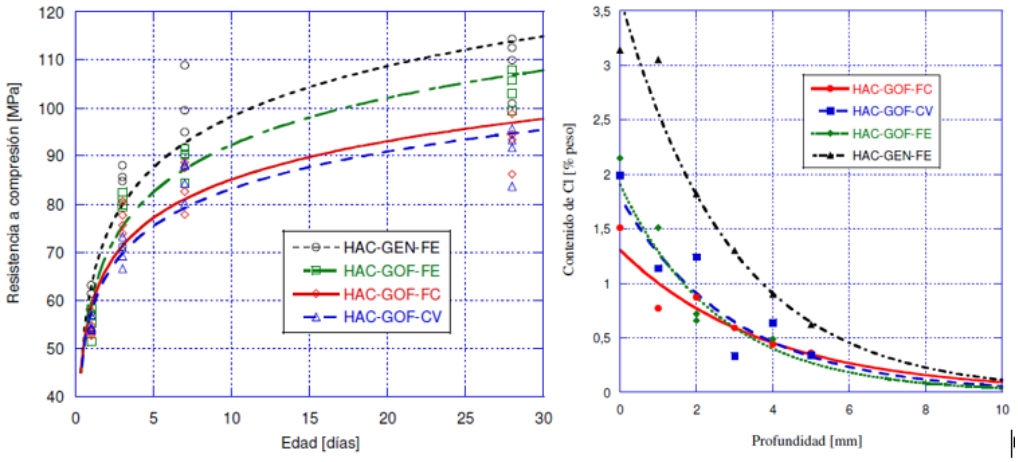
Adicionalmente, Sosa Yépez, en su tesis doctoral denominada “Incorporación de escorias siderúrgicas en hormigones autocompactantes de altas prestaciones”, busca presentar la conveniencia de reemplazar el material grueso y fino por escoria de alto horno, teniendo en cuenta que existe un vacío de información que estimule el uso de dicho material en los proyectos de construcción, en este sentido, se caracterizan los componentes, se fabrican mezclas de concreto y se determinan las propiedades mecánicas del hormigón.

En el documento del proyecto, se presentan los resultados de un estudio experimental en el que se diseñó un hormigón autocompactante de alta resistencia y baja permeabilidad, con

escorias siderúrgicas, de horno eléctrico y vitrificadas producto de la fabricación de la fundición dúctil, en este sentido, se crearon cilindros con las siguientes características: (1) Concreto con escoria como agregado grueso y fino – HAC-GEN-FE, (2) Concreto con agregado grueso convencional y escoria como arena – HAC-GOF-FE, (3) Concreto con materiales convencionales – HAC-GOF-FC, (4) Concreto con grava común y cenizas volantes – HAC-GOF-CV.

Se testaron las propiedades en estado fresco y endurecido de los hormigones confeccionados con áridos de origen natural e industrial, obteniendo que las escorias siderúrgicas permiten mejorar la resistencia a la compresión hasta en un 20% o 25% con respecto al concreto con árido natural, sin embargo, se ve reducida la durabilidad del concreto dado que la penetración de cloro es mayor en el caso del concreto elaborado con escoria, tal como se muestra en la siguiente figura.

Figura 5. Comparación de la resistencia y durabilidad del concreto

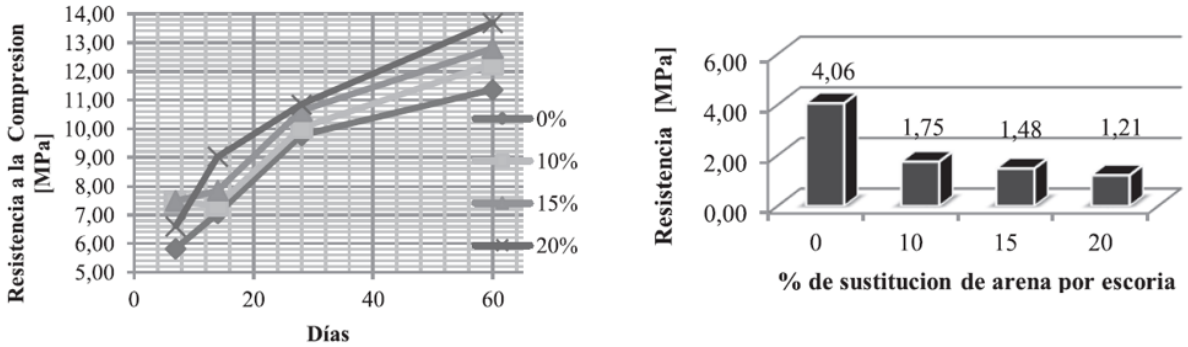


Fuente: *(Sosa Yépez, 2017)*

Dentro de las investigaciones en el estudio de reemplazo de agregado fino por escoria para la fabricación de concreto, también se encuentra el artículo de investigación con nombre "Reemplazo del agregado fino por escoria de horno de cubilote para la fabricación de concreto", en el cual, se presentan las propiedades físico-mecánicas del concreto fabricado con escoria de

horno de cubilote, reemplazando el 0, 10, 15 y 20 % de agregado fino. Se realizó la caracterización de la escoria como un material granular, de tal forma que se obtiene un material caracterizado como arena gruesa bien gradada con poca cantidad de finos. Los resultados del reemplazo del 20% de material son favorables, toda vez que, la resistencia a la compresión tiene un aumento en comparación con el valor esperado. Por otra parte, la relación agua – cemento del diseño de la mezcla resulta ser alta, lo que podría perjudicar la resistencia mecánica del material, adicionalmente, se destaca que, el módulo de rotura disminuye conforme aumenta la participación de la escoria en la mezcla de concreto (Ver **Figura *6***).

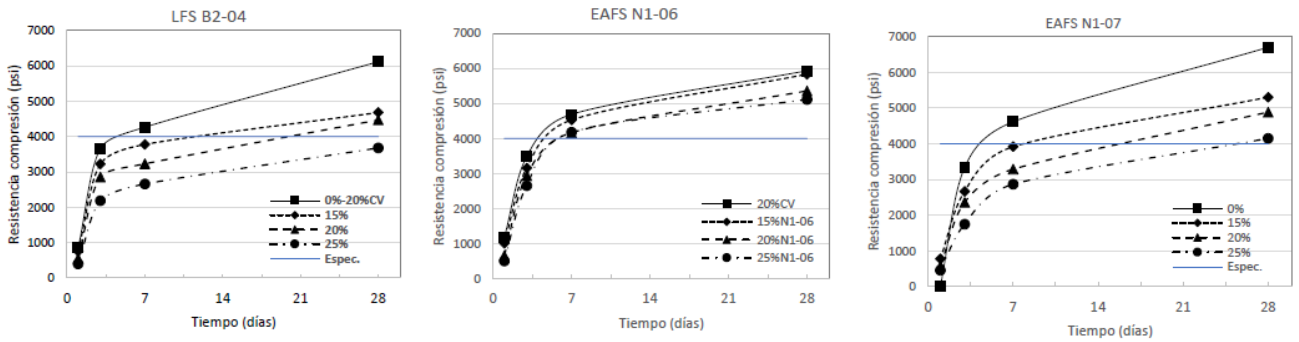
Figura 6. Comparación de resistencia a la compresión y módulo de rotura



Fuente: *(Cruz Hernández, Franco Durán, & Pérez Bustos, 2014)*

Adicionalmente, en el trabajo de grado desarrollado por Luis Conrado Suarez y denominado, “Evaluación de escorias siderúrgicas de horno de arco eléctrico en mezclas de concreto estructural”, se buscó evaluar el efecto del uso de escorias como material cementante suplementario y como agregado en concreto de 4000 PSI, y se encontró que la sustitución de agregados por escoria negra conduce a niveles superiores de resistencia a la compresión, sin embargo, en comparación con las mezclas fabricadas con ceniza volante, se disminuye la resistencia, tal como se muestra en las siguientes gráficas, en donde, LFS y EAFS corresponde a la escoria de horno de arco eléctrico y CV es ceniza volante .

Figura 7. Comparación del concreto con escoria y con ceniza volante

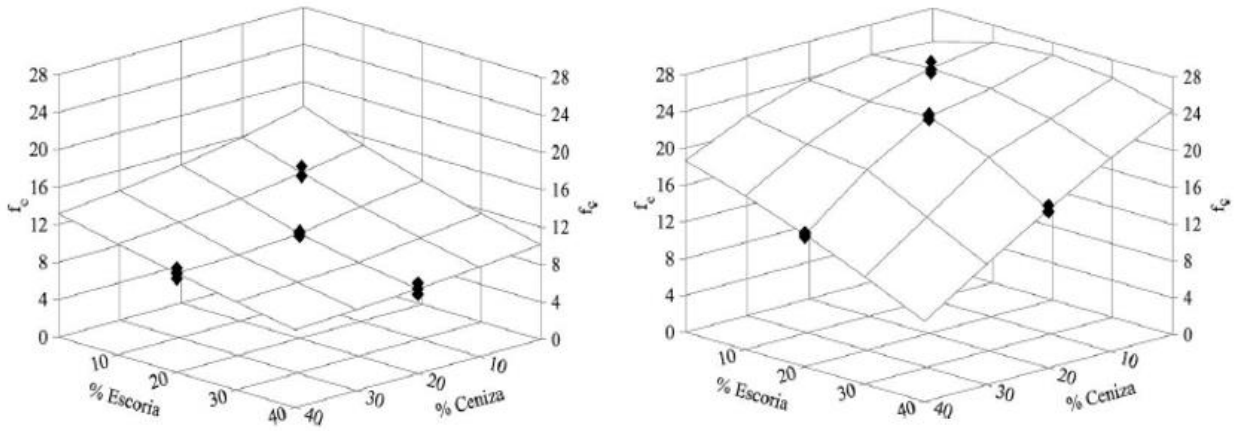


Fuente: *(Suárez Hincapié, 2018)*

Otro de los trabajos de investigación realizados con escoria de alto horno, fue desarrollado por para la revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales (RLMM), con título "Comportamiento mecánico de sistemas cementantes ternarios (cemento portland – Ceniza volante – Escoria de alto horno)", en donde, no solo se empleó la escoria, sino que también se adicionó a la mezcla la ceniza volante. En este orden de ideas, en el estudio se evaluó el efecto de la ceniza volante y la escoria de alto horno en las propiedades mecánicas de concretos ternarios. Los resultados indican que la mezcla con 10% de ceniza volante y 10% de escoria de alto horno presentó el mejor desempeño mecánico entre las cuatro mezclas evaluadas. Reemplazos superiores al 10% de estos materiales reducen las resistencias a compresión, tracción y el módulo de rotura a los 90 días.

De acuerdo con la *Figura 8*, a los 28 días, las mezclas con más ceniza volante mostraron menor desempeño en comparación con aquellas con más escoria de alto horno, debido a la inactividad inicial de la ceniza volante en la matriz cementante. La escoria de alto horno mejoró significativamente las resistencias a compresión a los 90 días, atribuido a su naturaleza hidráulica, mientras que la ceniza volante requiere más tiempo para activar su reacción puzolánica.

Figura 8. Resistencia de compresión a los 28 y 90 días - concreto con escoria y ceniza volante



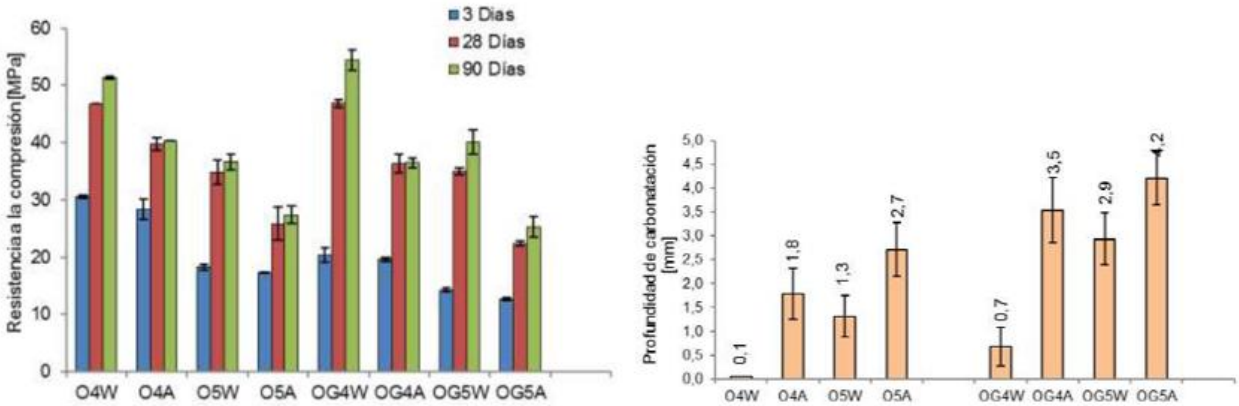
Fuente: *(Cárdenas Pulido, Lizarazo-Marriaga, & Aperador Chaparro, 2016)*

Otro elemento estudiado dentro del estado del arte relacionado con el objeto de la presente investigación es el "efecto del curado en las propiedades de mezclas de concreto con altos contenidos de escoria de hierro", entendiendo altos contenidos como la participación de la escoria en un 60% de la masa requerida de cemento. Este estudio proporciona otros análisis adicionales a los comúnmente estudiados, de esta forma, Lizarazo y Escobar (2016) estudiaron el efecto del curado al aire (A) y el curado húmedo (W) en las propiedades de resistencia a la compresión, resistencia a la carbonatación y resistencia a la penetración del ion cloruro, en mezclas de concreto elaboradas con altos volúmenes de escoria de alto horno y para relaciones agua cemento del 0.4 y 0.5.

Los resultados obtenidos mostraron que el curado seco tiene un efecto adverso en las propiedades de las mezclas, especialmente aquellas con altos contenidos de escorias. En contraste, las muestras con escoria curadas bajo condiciones de humedad presentaron un desempeño igual o superior al de las mezclas producidas únicamente con cemento hidráulico. En cuanto a la resistencia a la compresión, los especímenes que contienen escoria y que son curados

adecuadamente bajo el agua presentan resistencias superiores a los cilindros tradicionales (100% cemento), por el contrato, los especímenes que fueron curados al aire presentan una reducción en la resistencia aproximada del 9%. Ahora bien, en cuanto a la resistencia a la carbonatación, la adición de escoria reestructura los poros presentes en el todo compacto, y se presenta una mayor penetración de la carbonatación en el concreto.

Figura 9. Resistencia a la compresión y carbonatación especímenes con escoria y normales



Fuente: *(Lizarazo, Salas, & Escobar, 2016)*

Como se evidencia en los estudios citados anteriormente, en los cuales se evalúa la posibilidad de adicionar escoria a la mezcla de concreto, y así mismo, otros estudios relacionados con el objeto de la presente investigación, se muestran resultados prometedores dado que se consigue mejorar una o varias propiedades del concreto cuando en la mezcla se adiciona un material de desecho para otra industria (escoria de acero de alto horno), y aunque se presenta un aspecto positivo, es importante tener en cuenta que los ensayos realizados en cada estudio citado son diferentes y de la misma manera las proporciones en las cuales es reemplazado el agregado por escoria de alto horno.

Aun así, el enfoque que prima en cada estudio se basa en la protección del medio ambiente, de tal modo que se evidencia que es posible disminuir el daño ambiental que se genera

a través de las actividades de la industria de la construcción. De la misma manera, se encuentra un punto en común en cuanto al estudio de la resistencia a la compresión del concreto, con aumentos en los valores esperados para el diseño de la mezcla en ciertas condiciones características dadas por las propiedades de la materia prima.

Finalmente, cabe destacar una recopilación de varios estudios en los cuales se evalúa la adición de escoria de alto horno en la mezcla de concreto, denominada "Resistencia a la compresión de concretos con escoria de alto horno. Estado del arte re-visado", en donde, se realizó una revisión a diferentes estudios realizados y enfocados a la evaluación de la resistencia a la compresión de concretos, para los cuales se empleó la escoria de alto horno como material cementante en diferentes proporciones. Dentro de este artículo, se encuentra que el porcentaje de participación de la escoria tiene influencia en la resistencia a la compresión del concreto, por lo que su implementación estaría sujeta a ciertos rangos en los cuales se obtiene una mejora en la resistencia, lo que resulta viable en términos esculturales. De acuerdo con los autores, Cabrera, Garcia y Borges (2016),

> hay una ligera tendencia generalizada a la disminución de la resistencia cuando se incrementa la cantidad de escoria en la mezcla cementante, aunque (…) en el rango de 20% a 60% es donde se observan valores ligeramente mayores de *fc* comparados con el concreto de referencia, es decir sin escoria. (…) la incorporación y el incremento del nivel de escoria en la mezcla de concreto puede tener un carácter benéfico en las propiedades mecánicas del concreto endurecido, pero condicionado a cierto grado de reemplazo y a una determinada edad.

Por lo anterior, el estudio de la adición de escoria en la mezcla de concreto puede ser favorecedora en el contexto social, toda vez que, puede permitir mejorar la resistencia del concreto y ayuda con el cuidado del medio ambiente.

Problema de Investigación

La contaminación ambiental y el uso descontrolado de los recursos naturales corresponde a un problema que concierne a la población mundial, este se presenta desde diversos ámbitos y en múltiples disciplinas, puesto que en general el ser humano busca un desarrollo, producción y crecimiento en su quehacer cotidiano que con el paso del tiempo se ha vuelto desmedido y sin límites. El modelo económico y social actual produce la pérdida de biodiversidad, contaminación de los recursos naturales, deforestación descontrolada, y muchos otros problemas ambientales que contribuyen al deterioro acelerado de los ecosistemas.

Según la página Breeam.es (una compañía de certificación de la sostenibilidad), se estima que en el mundo los sectores más contaminantes son: el sector energético con cerca del 60% de las emisiones de dióxido de carbono; el sector de la moda produciendo miles de toneladas de dióxido de carbono, así como el gasto de agua y productos químicos nocivos para el mundo; consecuentemente, se encuentra el sector alimenticio, el cual genera cerca del 10% de las emisiones de dióxido de carbono y su vez, gasta el 70% de los recursos hídricos; seguidamente se encuentra el sector del transporte, del cual solo en Europa genera cerca del 24% de las emisiones de dióxido de carbono; y por último, el sector de la construcción.

Enfatizando en el sector de la construcción y los productos que desde la industria se generan, se evidencia que existe un valor de destrucción y contaminación, puesto que los materiales empleados son obtenidos de la naturaleza y además se producen residuos contaminantes. Sumado a esto, el crecimiento constante de la población aumenta la demanda en el uso de materiales para satisfacer las necesidades relacionadas con la infraestructura física de las ciudades. En otras palabras, “el uso descontrolado de los recursos naturales ha traído serios problemas ambientales durante muchos años. Por ejemplo, la arena y la grava extraídas de los lechos de los arroyos causaron daños ambientales” (Montjoy, 2023).

En este sentido, la industria de la construcción es uno de los sectores productivos contaminantes, porque según lo menciona Lombera, “el sector consume hasta un 60% de todas las materias primas extraídas de la tierra” (360 en concreto, 2020). Y de acuerdo con Cesar Granada, la industria en cuestión es responsable del 40% de la contaminación del agua potable, del 50% de los desechos en los vertederos y aproximadamente el 23% de las emisiones globales de dióxido de carbono.

Así pues, el sector de la construcción consume gran cantidad de recursos naturales y por tanto contribuye al deterioro de los ecosistemas, adicionalmente, la forma de extracción de la materia prima para la elaboración del concreto agrava el problema, pues puede generar contaminación del recurso hídrico cuando el proyecto se encuentra cerca de una ronda hídrica y, además, genera una perturbación directa o indirecta de los ecosistemas. Lo anterior indica que el concreto es uno de los materiales que impacta a los ecosistemas y por tanto al medio ambiente, puesto que hace parte de gran cantidad de proyectos en ingeniería, siendo el material comúnmente empleado gracias a las propiedades y características que posee.

Por este motivo, es necesario buscar alternativas sostenibles en cuanto a los materiales empleados para la fabricación del concreto con el fin de disminuir el impacto que está causando actualmente en el mundo. En este orden de ideas, una de las alternativas corresponde a la sustitución total o parcial del agregado por escoria de alto horno; un producto derivado de la producción del hierro, del cual se estima una elaboración de 260 kg y 300 kg de escoria por tonelada de producción de hierro según A. Jamshidi et al., además corresponde a un desecho para esa industria dentro de las actividades propias de la producción del material y de acuerdo con estudios, este material proporciona aumento en la resistencia a la compresión del concreto cuando el agregado grueso y/o fino es reemplazado en ciertas proporciones.

En este sentido, se busca conocer si la sustitución de material común por materia prima alternativa (desecho de otra industria) resulta beneficioso para el concreto, es decir, si se obtienen resultados similares o con un aumento en los valores de resistencia esperados según el diseño de la mezcla, con el fin de plantear alternativas para la fabricación de mezclas de concreto más amigables con el medio ambiente, que permitan disminuir el consumo desmedido de recursos naturales y la perdida de ecosistemas al minimizar la necesidad de material granular convencional.

Lo anterior, se logra a partir de un ejercicio de investigación de tipo experimental, en el cual se evalúe la adición de escoria de alto horno en una mezcla de concreto de peso normal, partiendo de la elaboración de mezclas de concreto con escoria de alto horno como material granular, entendiendo evaluación como la elaboración del ensayo de resistentica a la compresión y la comparación de resultados con base en una mezcla común elaborada con materia prima convencional (arena y grava).

Objetivos

Objetivo General

Evaluar el comportamiento mecánico del concreto de peso normal reemplazando el agregado fino por escoria de alto horno.

Objetivos Específicos

- Determinar las características químicas y mecánicas de la escoria de alto horno.
- Caracterizar el material granular según las normas técnicas colombianas (NTC).
- Diseñar la mezcla de concreto normal y con la adición de escoria de alto horno en diferentes porcentajes.
- Comparar la resistencia a la compresión de la mezcla de concreto fabricada con material pétreo común y una mezcla con escoria de alto horno.

Marco Conceptual

Concreto, Materia Prima y Propiedades

El concreto como material comúnmente usado para la elaboración de obras de infraestructura en pro del desarrollo de ciudades y países, ha permitido el desarrollo económico y social de la población mundial, por tal motivo, es un material fundamental con el cual los arquitectos, ingenieros, constructores y trabajadores afines con el sector de la construcción, diseñan y elaboran obras para el desarrollo de ciudades y su infraestructura.

En este orden de ideas, es menester reconocer que el concreto está constituido por "diferentes materiales, los cuales debidamente dosificados y mezclados se integran para formar elementos monolíticos, que proporcionan resistencia y durabilidad a las estructuras. El comportamiento estructural del concreto depende de su diseño, elaboración, control de calidad y las buenas prácticas de colocación, curado y acabo" (Gonzales Chumpitazi & Sotomayor Sanchez, 2015). Así, el éxito de una mezcla de concreto depende del conocimiento y experticia del profesional encargado para la elaboración de la mezcla de concreto, y así mismo, del cumplimiento de los requerimientos técnicos de los materiales según la normativa.

Por lo anterior, se requiere definir el concepto de concreto, sus propiedades e insumos para lograr obtener un resultado satisfactorio en el diseño y elaboración del hormigón, cuya característica primordial corresponde a la resistencia a la compresión, sin dejar de lado aquellos procesos químicos que intervienen y son de vital importancia en el proceso de curado y endurecimiento. Varios autores han definido el concreto como:

> La mezcla de un material aglutinante (Cemento Portland Hidráulico), con material de relleno (agregado o áridos), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forma un todo compacto (piedra artificial) y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión (Sánchez de Guzmán, 2001)

> Una mezcla de arena, grava, roca triturada, u otros agregados unidos en una masa rocosa por medio de una pasta de cemento y agua. En ocasiones, uno o más aditivos se agregan para cambiar ciertas características del concreto, tales como la ductilidad, durabilidad y tiempo de fraguado. (Mc Cormac & Russell, 2017)

Es por tanto que el estudio de este elemento y sus características (como la resistencia) van ligadas a los materiales constituyentes, es decir, a la materia prima que lo compone o es necesaria para la elaboración del concreto, por lo anterior, resulta importante definir las características de estos materiales y así mismo las principales propiedades de estudio.

Cemento Hidráulico

Material que es responsable de aglutinar los insumos para la fabricación del concreto, es decir, el que permite unir los componentes gracias a la reacción química que presenta con el agua. De acuerdo con Cementos Tequendama (2017), el cemento hidráulico

> es la mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro, procesados generalmente en hornos rotatorios a altas temperaturas y mezclados con yeso (…) Este material tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia del agua, presentándose un proceso de reacción química que se conoce como hidratación. Es mayormente empleado en la construcción, justamente por esa solidez que reviste como adherente y aglutinante.

Existen diversas clases de cemento, las cuales presentan una solución específica de acuerdo con las necesidades del proyecto y por tanto permite suplir un propósito. Comúnmente, el cemento hidráulico UG es el empleado para proyectos de ingeniería, cuyas características son de uso general y las exigencias no están sujetas al ataque de sulfatos o bien a temperaturas cuestionables durante el proceso de hidratación.

Agua

El agua es esencial en la producción de concreto, facilitando los procesos químicos con el cemento para lograr una mezcla compacta. Se utiliza en todas las etapas, desde el lavado de agregados hasta el curado, y la cantidad de agua afecta la trabajabilidad y resistencia del concreto. El lavado de agregados gruesos elimina impurezas, y la relación agua/cemento es crucial en el mezclado para garantizar las características deseadas, este es uno de los elementos más importantes en la mezcla, puesto de ello depende la durabilidad, impermeabilidad, resistencia y acabado del concreto.

Ahora, la cantidad de agua en el mezclado afecta directamente la resistencia del concreto. Un exceso de agua puede resultar en porosidad y reducción de resistencia. El agua de curado asegura la hidratación adecuada del cemento durante el endurecimiento, y su cantidad varía según la temperatura y humedad ambiental.

Agregados o Áridos

La arena y la grava hacen parte de los agregados, que corresponden a la materia prima para la elaboración del concreto y constituyen un gran porcentaje del volumen de mezcla, de acuerdo con Eliecer y Víctor (2010),

> Los agregados son el mayor constituyente del concreto, generalmente componen más del setenta (70) por ciento del material de un metro cúbico de concreto y son los que hacen que éste sea un material económico de construcción. En la elaboración de concreto, usado en la mayoría de las construcciones, los agregados frecuentemente son obtenidos de arenas naturales y depósitos de grava, y para su selección hay que tener presente que sus propiedades difieren considerablemente una de otra.

Los agregados, entendidos como arena y grava, se pueden clasificar en función de su procedencia, su tamaño y su densidad, para los cuales se deben estudiar las propiedades químicas

y física de acuerdo con la norma NTC correspondiente, además, se deben tener controles en la dosificación de sus componentes, de los cuales el sílice y la presencia de él o no en la mezcla, es que depende que se dé origen a la reacción álcali-agregado, puesto que es en el agregado en donde se encuentra el sílice que reacciona con el Álcali del cemento, afectando directamente la estructura del material en estado endurecido, comprometiendo su resistencia a la compresión y su durabilidad.

Propiedades del Concreto en Estado Endurecido

De acuerdo con lo mencionado en los numerales anteriores, la selección de los materiales y sus características influyen en las propiedades del concreto, por lo que es importante garantizar una correcta consecución de materiales y estudio de los mismos a fin de generar un hormigón que cumpla con las características deseadas según el proyecto a realizar. Aunque existen varias propiedades del concreto en estado endurecido, la propiedad de la resistencia a la compresión es comúnmente estudiada, toda vez que permite garantizar el comportamiento del concreto a nivel de diseño y durabilidad.

La resistencia a la compresión es un factor determinante para los proyectos de construcción que hagan uso del material artificial, toda vez que, el diseño de muchas estructuras se fundamenta en esta propiedad, la cual depende de factores como la resistencia de la pasta endurecida, la de las partículas y la adherencia entre la materia prima para la fabricación del concreto. Es importante mencionar que, el concreto se diseña bajo la suposición que el material resiste únicamente fuerzas de compresión, razón por la cual, se combina con el acero, material que es resistente a las fuerzas de tracción.

En este orden de ideas, dado que la resistencia a la compresión es uno de los parámetros de calidad del concreto más importantes, es menester mencionar que existen factores que inciden en esta propiedad, en cuyo caso, la relación agua cemento (A/C) es la más importante, puesto que

de ello depende la trabajabilidad del concreto, sin embargo, el tipo de cemento y su calidad, los agregados y sus propiedades, el agua y sus características, y la proporción de cada uno en la mezcla de concreto también influyen en la resistencia a la compresión.

Así, cuando se tiene una relación agua cemento (A/C) baja, la resistencia a la compresión es alta y la trabajabilidad es baja, por el contrario, cuanto la relación A/C es alta, el concreto tiende a tener una baja resistencia a la compresión debido a que existirá presencia de poros en la mezcla. Por otro lado, el tipo de cemento y la cantidad son factores que también determinan los resultados del concreto, por tanto, su dosificación es importante, puesto que el cemento es el único material que genera una reacción para obtener una pasta que actúe como aglutinante de los componentes.

En términos generales, durante el diseño de la mezcla, la selección de los parámetros e insumos antes mencionados determina la resistencia a la compresión del concreto, puesto que influyen de forma directa en esta propiedad. Si bien existen procedimientos de diseño y recomendaciones basadas en estudios previos, que permiten acercarse a la condición deseada, la experticia en la elaboración del diseño y la preparación de la mezcla para su posterior colocación, son elementos determinantes para lograr obtener un resultado satisfactorio en cuanto a la propiedad característica del concreto, la resistencia a la compresión.

El estudio de las propiedades del concreto, en específico la resistencia a la compresión, ha llevado a desarrollar métodos de ensayo y equipos que permiten conocer un valor numérico bajo el cual se pueda conocer de forma específica que tan cercano a la realidad este el valor esperado o deseado. La normatividad colombiana establece bajo la NTC 673 el método de ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto

Escoria de Alto Horno

La fabricación de acero o hierro por medio de procesos industriales conlleva a la generación de residuos, que en muchos casos se consideran desechos y proporcionan un problema para la sociedad en cuanto a su disposición final, lo anterior, dado el volumen de producción de material de desecho. Dentro de los subproductos que resultan de los procesos siderúrgicos están: escorias, polvos de acería, refractarios, arenas de fundición y cascarilla de laminación, en donde,

> el principal residuo generado en volumen, en los procesos de fabricación de las aleaciones férreas, lo constituyen las escorias obtenidas tras el enfriado y solidificación de las impurezas presentes. Éstas se pueden definir como el material que, debido a su densidad, flota sobre los caldos líquidos que constituyen dichas aleaciones (Sosa Yépez, 2017).

El material que resulta como residuo de la producción de hierro y el cual se considera en muchos casos como desecho, puede tener propiedades que resulten óptimas para su uso en la industria de la construcción, más en específico en la elaboración de concreto, así, con base en los numerales anteriores y el objeto de investigación, la escoria de alto horno puede ser empleada para la fabricación del concreto, como agregado y en pro del cuidado del medio ambiente.

Sosa Yépez (2017), menciona en su tesis doctoral una definición de la escoria siderúrgica, la cual se basa en el hecho que es un subproducto de la elaboración de hierro y el proceso de obtención de este, en específico,

> Se define como el producto resultante de las reacciones químicas entre la materia prima a fundir, los materiales añadidos al horno y las impurezas oxidadas durante el refinado de la aleación, que permanece flotando en la superficie de los caldos por la menor

> densidad que presenta respecto al metal líquido. Durante el proceso, se separa del caldo para, posteriormente, solidificar mediante enfriamiento (Sosa Yépez, 2017)

Si bien, el proceso de obtención de la escoria es, en términos generales el mismo, su composición puede variar en función de las técnicas de fabricación y los tratamientos aplicados, por lo que sus características también varían y por tanto su aplicabilidad como material granular para la elaboración del concreto, así, es importante realizar estudios de caracterización, tales como petrografía, con el fin de evaluar la composición química y el comportamiento durante y después de las reacciones que ocurren en la elaboración de la mezcla de concreto y el concreto propiamente dicho.

Complementando lo anterior, en las escorias de alto horno, la "composición química depende de la materia prima con que se cargue el horno y del tipo de coque utilizado como combustible" (Sosa Yépez, 2017), lo que ratifica la necesidad de realizar análisis y estudios al material antes de emplearlo como agregado u otro componente del concreto.

Adicionalmente, "las características y usos de las escorias de horno alto están influenciados por la manera en que se procede a su solidificación" (Sosa Yépez, 2017), lo anterior, conlleva a la obtención de diferentes tipos de escoria en función de la velocidad de enfriamiento empleada, dentro de estas están aquellas con: (1) estructura cristalina, (2) estructura expandida y (3) estructura granulada. De acuerdo con la autora de la tesis doctoral denominada "Incorporación de escorias siderúrgicas en hormigones autocompactantes de altas prestaciones" (2017),

> Como adición en los hormigones, las más empleadas son las granuladas. Para ello, se enfrían bruscamente con un chorro de agua tras ser retiradas del horno, confiriéndoles una estructura vítrea. Se componen, principalmente, por óxidos de cal (CaO), sílice (SiO2) y magnesia (MgO). Presentan un color gris oscuro

Por lo anterior, el proceso productivo del material y por tanto sus características finales pueden variar y en función de ello, la afectación positiva o negativa dentro del concreto puede verse influenciada de conformidad con la composición química de la escoria y las propiedades mecánicas que presente.

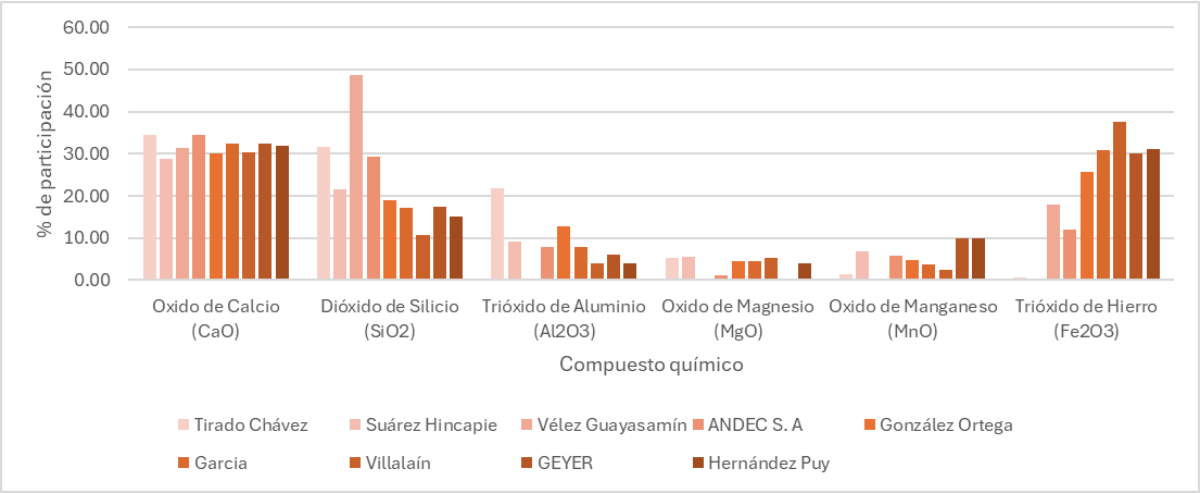
De acuerdo con la publicación denominada "Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico", la composición química y mineralógica de las escorias de alto horno varía entre los materiales y límites mostrados en la *Tabla 2*, en donde, la variación en la composición química de las escorias cambia en función del proceso siderúrgico y el tipo de material con el cual se obtiene, sin embargo, para un mismo acero, la composición química es bastante similar. Por otra parte, la *Figura 10* muestra según varios autores la composición química de la escoria, en donde, el óxido de calcio, dióxido de silicio y trióxido de hierro son los compuestos que típicamente se encuentran en mayor cantidad dentro de la escoria, por su parte, se puede identificar que el porcentaje de participación según los diferentes autores y de acuerdo con la escoria analizada es bastante similar.

Tabla 2. Composición química de la escoria

Compuesto químico	Nombre	Límites
SiO_2	Dióxido de silicio	27 – 40 %
Al_2O_3	Óxido de aluminio	5 – 33 %
CaO	Óxido de calcio	30 – 50 %
MgO	Óxido de magnesio	1 – 21 %
Fe_2O_3	Óxido de hierro (III)	< 1 %
S	Azufre	< 3 %
Cr_2O_3	Óxido crómico	0.003 – 0.007 %
Cl	Cloro	0.19 – 0.26 %
TiO_2	Dióxido de titanio	< 3 %
F	Flúor	0.09 – 0.23 %
MnO_2	Dióxido de manganeso	< 2 %
P_2O_5	Óxido de fosforo	0.02 – 0.09 %

Fuente: *(Puertas, 1993)*

Figura 10. Composición química de la escoria según varios autores



Fuente: Adaptado de *(Tomalá Palma & Pozo Reyes, 2022)*

Por otra parte, se destaca que,

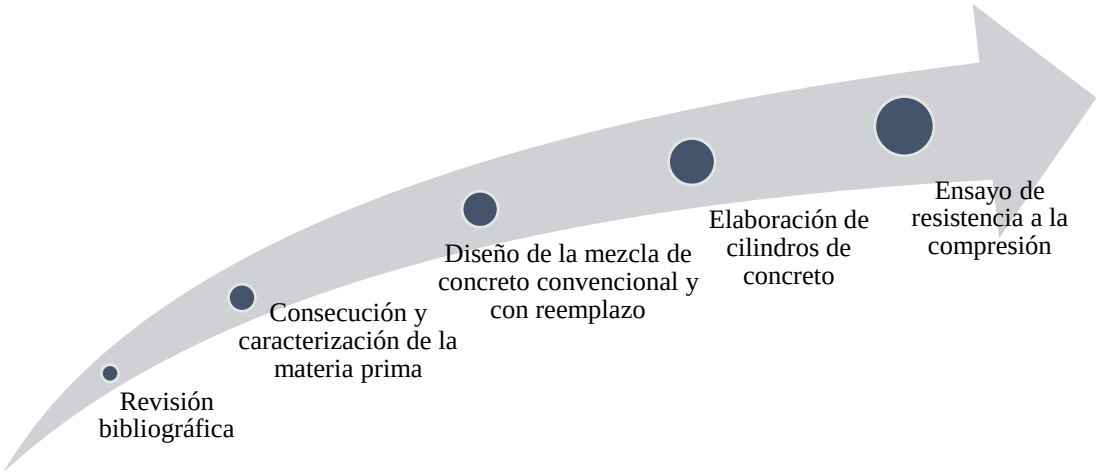
> Las escorias de alto horno; y más concretamente las granuladas o peletizadas, tienen capacidad hidráulica latente o potencial; es decir, que finamente molidas y amasadas con agua son capaces de fraguar y endurecer. Esta capacidad hidráulica potencial de las escorias está muy atenuada y se manifiesta con lentitud, precisando de ciertos activadores para acelerar sus reacciones de hidratación. (Puertas, 1993)

Teniendo en cuenta lo anterior, la escoria presenta propiedades y características que son propias de las reacciones que se presentan cuando el cemento reacciona con el agua y forma la pasta que aglutina los materiales. Por lo tanto, su empleabilidad en la mezcla de concreto podría resultar beneficiosa en términos de las propiedades finales del material y el cuidado del medio ambiente con el uso de los residuos producidos por la elaboración de elementos de acero.

Metodología

El desarrollo de la propuesta se hará teniendo en cuenta una serie de pasos consecutivos que ayudaran a verificar la conveniencia de reemplazar el material granular común por escoria de alto horno, en el siguiente esquema se presenta el diagrama del plan de trabajo.

Figura 11. Diagrama de flujo de la metodología



Fuente: Elaboración propia

Revisión Bibliográfica

Para el desarrollo y alcance de los objetivos propuestos será necesario recopilar información que permita conocer el estado del arte relacionado con el objeto de estudio, *elaboración de cilindros de concreto reemplazando el agregado por escoria de alto horno en diferentes proporciones.* De tal forma que se obtenga un panorama general en cuanto a las propiedades que presentan los cilindros de concreto y como afecta la escoria de alto horno en la mezcla, dando así una orientación sobre los resultados que se pueden obtener.

Adicionalmente, será necesario investigar las normas y procedimientos que involucran la preparación de los materiales, la elaboración de una mezcla de concreto, el curado de este y los ensayos para conocer más información sobre las propiedades finales del concreto. Por tanto, se requiere conocer cómo se realiza la caracterización de los agregados a través de ensayos de

laboratorio que permitan establecer insumos adecuados y de características aceptables para obtener un concreto que cumpla con la normativa colombiana, así mismo, es menester conocer los ensayos que permiten establecer las propiedades físicas (resistencia a la compresión) de la roca artificial creada y si el reemplazo de material trae mejoras en el comportamiento y respuesta del material frente a la aplicación de cargas.

Consecución de Materiales

Los agregados pétreos (arena y grava) empleados para la elaboración del concreto y el desarrollo de la propuesta, son obtenidos de la empresa "Construrama", una red de distribución de materiales para construcción; si bien son materiales para obras de construcción, estos deben ser caracterizados para garantizar las propiedades mínimas necesarias en la mezcla de concreto de acuerdo con la normatividad colombiana (Normas NTC). Como agente aglutinante para la mezcla de hormigón, se emplea cemento hidráulico Tipo UG de uso general de la empresa "Argos", que, de acuerdo con la NTC 121 es el cemento hidráulico para construcción general y se usa cuando uno o más de los tipos especiales no son requeridos. Finalmente, se empleó escoria proveniente de procesos siderúrgicos, que resulta como desecho de la producción de acero.

Caracterización de los Agregados

La caracterización de los materiales para elaborar una mezcla de concreto es de vital importancia, pues corresponden a un insumo que determina la posibilidad de emplear cierto material como materia prima y proporciona los datos básicos para diseñar una mezcla de concreto. La correcta determinación de las características y propiedades de los materiales permitirá obtener resultados adecuados en la resistencia del hormigón, entre otras propiedades comúnmente estudiadas.

Material Grueso y Fino

La caracterización de los materiales comúnmente empleados en las mezclas de concreto se realiza teniendo en cuenta los ensayos según los materiales y la Norma Técnica Colombiana que sea aplicable a cada uno, las normas específicas y la referencia son mencionadas en la *Tabla 3*. A partir de ello se determina la granulometría, la densidad, masa unitaria, pesos específicos, proporcionando información importante antes, durante y después de la elaboración de la mezcla de concreto.

Tabla 3. Ensayos para agregados en la mezcla de concreto

Ensayo	Norma NTC	Referencia ASTM
Granulometría	77	C-136
Especificaciones de los agregados	174	C-33
Densidad y absorción del agregado fino	237	C-128
Densidad y absorción del agregado grueso	176	C-127
Contenido de humedad de los agregados	1776	C-566
Masa unitaria de los agregados	92	C-29M

Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, se resalta que los ensayos mencionados son los requeridos para desarrollar el diseño de la mezcla según el procedimiento establecido por el ACI 211.1, y que son objeto de elaboración para desarrollar la propuesta de investigación.

Granulometría.

Este ensayo se usa para determinar cuantitativamente la distribución de tamaños de las partículas de los materiales granulares, es decir, arena y grava. A su vez es útil para la determinación del tamaño máximo de los agregados. Su importancia radica en los resultados, que de acuerdo con la norma NTC 77,

> se usan para determinar la correlación entre la distribución de los tamaños de las partículas y los requisitos específicos de aplicación, y para suministrar los datos

necesarios para el control de la producción de varios materiales y mezclas que contienen agregados. (ICONTEC, NTC 77, 2018).

De acuerdo con lo anterior, y teniendo en cuenta que el ensayo proporciona información relevante para el control de la producción del concreto, el ensayo resulta siendo uno de los más importantes para la elaboración de mezclas de concreto, pues permite establecer el cumplimiento de las características del material con referencia a las normas técnicas nacionales. Para el caso de la grava se debe tener en cuenta que la masa mínima para tamizar se encuentra establecida en la siguiente tabla.

Tabla 4. *Tamaño de la muestra agregado grueso para granulometría.*

Tamaño máximo nominal aberturas cuadradas (mm)	Masa mínima Muestra de ensayo (kg)
9.5	1
12.5	2
19.0	5
25.0	10
37.5	15
50.0	20
63.0	35
75.0	60
90.0	100
100.0	150
125.0	300

Fuente: (ICONTEC, NTC 77, 2018)

Para este ensayo se debe contar con balanza, tamices y horno, con los cuales se realiza el siguiente proceso:

a. *Preparación de la muestra*: Es necesario que la muestra de agregado se encuentre seca, y se recomienda realizar el secado a una temperatura de 110°C ± 5 °C, como lo indica la norma NTC 77.

b. *Tamizado*: La muestra se pasa a través de una serie de tamices consecutivos que son seleccionados de acuerdo con las necesidades del proyecto, donde inicialmente el total de la muestra se debe colocar en el tamiz de mayor abertura. La muestra se tamiza durare un

periodo determinado para asegurar la separación de las partículas en distintos tamaños, luego de esto, se pesa la cantidad de material retenida en cada uno de los tamices y así determinar la distribución en tamaño de las partículas

c. *Calculo distribución granulométrica:* Con el peso obtenido anteriormente, se procede a realizar el cálculo de *"los porcentajes de material que pasan cada tamiz, los porcentajes totales de material retenido en los mismos, o los porcentajes en varias fracciones con una aproximación del 0,1 % con base en la masa total de la muestra seca"*, según la NTC 77. Esto para construir la curva granulométrica.

Especificaciones de los agregados

Los agregados grueso y fino que se emplean en el concreto deben cumplir una serie de características en cuanto a la distribución de las partículas, de tal forma que se garantice el comportamiento y las propiedades de la mezcla en estado endurecido y fresco. Por tal motivo, la distribución granulométrica del agregado grueso y fino obtenida del ensayo con la norma NTC 77, debe cumplir ciertos rangos o límites granulométricos para cada tamiz, según se especifica en la NTC 174, la cual "establece los requisitos de gradación y calidad para los agregados fino y gruesos para uso en concreto" (ICONTEC, NTC 174, 2018).

Las siguientes tablas y gráficas muestran los valores recomendados de los porcentajes pasa para cada tamiz en el agregado fino y grueso respectivamente, los cuales deben estar en concordancia con los resultados del ensayo realizado a los materiales a usar para la mezcla.

Tabla 5. *Límites granulométricos agregado fino*

Tamiz NTC 32	Porcentaje pasa	Tamiz NTC 32	Porcentaje pasa
9.5 mm	100	600 µm	25 a 60
4.75 mm	95 a 100	300 µm	5 a 30
2.36 mm	80 a 100	150 µm	0 a 10
1.18 mm	50 a 85	75 µm	0-30

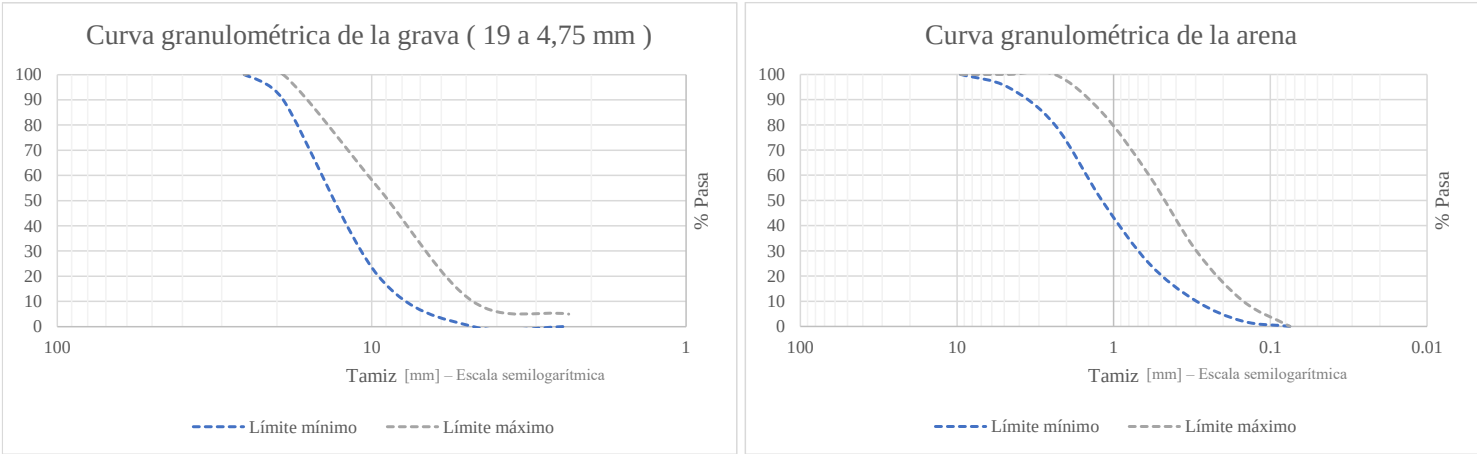
Fuente: (ICONTEC, NTC 174, 2018)

Tabla 6. Límites granulométricos agregado grueso

TN (mm)	Material que pasa uno de los siguientes tamices													
	100mm	90mm	75mm	63mm	50mm	37.5mm	25mm	19mm	12.5mm	9.5mm	4.75mm	2.36mm	1.18mm	300
90 a 37.5	100	90-100	-	25-60	-	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-	-
63 a 37.5	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-	-
50 a 25	-	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
50 a 4.75	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	-	0-5	-	-	-
37.5 a 19	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5	-	-	-	-
37.5 a 4.75	-	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	0-5	-	-	-
25 a 12.5	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-10	0-5	-	-	-	-
25 a 9.5	-	-	-	-	-	100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-5	-	-	-
25 a 4.75	-	-	-	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5	-	-
19 a 9.5	-	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	0-5	-	-	-
19 a 4.75	-	-	-	-	-	-	100	90-100	-	20-55	0-10	0-5	-	-
12.5 a 4.75	-	-	-	-	-	-	-	100	90-100	40-70	0-15	0-5	-	-
9.5 a 2.36	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85-100	10-30	0-10	0-5	-
9.5 a 1.18	-	-	-	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	5-30	0-10	0-5
4.75 a 1.18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85-100	10-40	0-10	0-5

Fuente: (ICONTEC, NTC 174, 2018)

Figura 12. Límites granulométricos grava y arena NTC 174



Fuente: Elaboración propia

Densidad y absorción del agregado fino

La determinación de la densidad aparente y nominal y la absorción del agregado fino permite obtener los parámetros que son generalmente empleados en el diseño de la mezcla de concreto bajo el procedimiento establecido por la ACI 211.1. Estos ensayos se realizan de acuerdo con la norma NTC 237, la cual establece una serie de pasos para preparar la muestra del ensayo y el procedimiento a ejecutar con el fin de obtener los insumos necesarios para determinar la densidad y la absorción del agregado fino. Para la ejecución del ensayo se requiere de: balanza, picnómetro, molde (cono) y pistón.

a. *Preparación de la muestra:* Se toma una muestra representativa y se seca hasta obtener masa constante, posteriormente se sumerge durante 24 horas y se decanta el exceso de agua evitando la perdida de finos, para ello se extiende el material y se aplica una corriente de aire hasta alcanzar una condición saturada superficialmente seca (SSS).
b. *Ensayo de cono para humedad superficial:* Para garantizar la condición SSS de la muestra se emplea el ensayo de cono, el cual consiste en usar un cono dispuesto con el diámetro mayor en contacto con una superficie plana y no absorbente, y se llena el mismo con material en condición suelta hasta que rebose el orificio superior, posteriormente se apisona el material con 25 caídas de un pistón a 5mm de la superficie del agregado. Finalmente se remueve el material sobrante y el cono, y si el material se asienta levente indica una condición SSS deseada para el ensayo.
c. *Procedimiento del ensayo:* Se llena el picnómetro parcialmente con agua y se adiciona material (aprox. 500gr) en condición SSS (se determina su masa – dato S), posteriormente se llena con agua hasta un 90% de la capacidad, se retiran las burbujas de aire (girar, invertir, agitar) y se completa la capacidad del picnómetro hasta la marca de calibración, determinando la masa del picnómetro con agua y material (dato C). Se retira el material y

se seca hasta masa constante (determinar su peso – dato A), y finalmente se determina el peso del picnómetro con agua hasta la marca de calibración (dato B).

d. *Cálculo de la densidad y absorción:* Los resultados se obtienen por medio de las expresiones de la Ecuación 1 y Ecuación 2 que indica la NTC 237.

$$D_{ap} = \frac{A}{B + S - C} \tag{1}$$

$$\%\, Absorción = \left[\frac{S - A}{A}\right] \cdot 100 \tag{2}$$

Donde:

D_{ap} : *densidad aparente, g/cm³*

A : *masa en el aire de la muestra secada al horno, gramos*

B : *masa del picnómetro lleno con agua, gramo*

S : *masa de la muestra saturada y superficialmente seca*

C : masa del picnómetro con la muestra y el agua hasta la marca de calibración

Densidad y absorción del agregado Grueso

La norma técnica Colombia que establece los requisitos y procedimiento para determinar las propiedades de densidad y absorción del agregado de partículas gruesas es la NTC 176, la cual es equivalente a la ASTM C127, y en donde se establece que el ensayo consiste en:

Una muestra de agregado se sumerge en agua durante 24 h ± 4 h hasta saturar los poros. Luego se remueven el agua y se seca la superficie de las partículas, y se determina su masa. Posteriormente, el volumen de la muestra es determinada por el desplazamiento de agua. Finalmente, la muestra es seca al horno y se determina su masa. Se usan las masas obtenidas y con las ecuaciones de este método de ensayo, para calcular la densidad relativa (gravedad especifica) y la absorción. (ICONTEC, NTC 176, 2019)

Para ejecutar el ensayo, se requiere preparar la muestra del ensayo, en donde se debe: (1) Seleccionar una muestra representativa de material, (2) retirar el material que pasa el tamiz N4 por medio de lavado en seco y completo, y (3) finalmente secar la muestra hasta alcanzar masa constante. Adicionalmente, se requiere de: Balanza, recipiente (malla), tanque de agua y tamices.

A partir del procedimiento descrito con anterioridad, se determinan los valores de la densidad y absorción por medio de las siguientes expresiones:

$$D_{relativa} = \frac{A}{B - C} \tag{3}$$

$$\%\ Absorción = \left[\frac{B - A}{A}\right] \cdot 100 \tag{4}$$

Donde:

A : *Masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno*

B : *Masa en el aire de la muestra de ensayo saturada y superficialmente seca SSS*

C : *Masa aparente en el agua de la muestra de ensayo saturada*

Contenido de humedad de los agregados

El método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados, lo establece la norma NTC 1776, cuyo objeto consiste en determinar el porcentaje de humedad evaporable en una muestra de agregado que es sometida a secado.

Para su desarrollo se requiere de balanza, fuente de calor y recipiente. Y el procedimiento consiste en seleccionar una muestra representativa de material, pesar el material, secar completamente hasta obtener masa constante y determinar nuevamente el peso seco del agregado, bien sea grueso o fino. La expresión para la determinación de la humedad es la siguiente:

$$Humedad = \frac{H - S}{S} \tag{5}$$

Donde:

H : *Masa inicial de la muestra*

S : *Masa de la muestra seca*

Masa unitaria de los agregados

Determinar la masa unitaria de los agregados en condición suelta y compacta, es importante para establecer las proporciones de cada agregado en la mezcla de concreto. La Norma Técnica Colombiana NTC 92 indica los requisitos necesarios en la ejecución del ensayo. Para realizar adecuadamente dicho ensayo, se debe contar con un molde, el cual

> Debe ser impermeable y con sus bordes superior e inferior alineados y uniformes, y suficientemente rígido como para mantener la forma bajo un uso fuerte. El molde debe tener una altura aproximadamente igual a su diámetro, pero en ningún caso su altura debe ser menor del 80% o mayor del 150 % de su diámetro (ICONTEC, NTC 92, 2019)

A su vez, la capacidad del molde se determina de acuerdo con la *Tabla 7*, y de conformidad con la norma, se establece que para ensayar el material se toma el tamaño máximo nominal del agregado o el menor al listado.

Tabla 7. Capacidad de los moldes ensayo de masa unitaria

Tamaño máximo nominal (mm)	Capacidad molde m3 (L)
12.5	0.0028 (2.8)
25	0.0093 (9.3)
37.5	0.0140 (14)
75	0.0280 (28)
100	0.0700 (70)
125	0.1000 (100)

Fuente: (ICONTEC, NTC 92, 2019)

Por otro lado, se debe tener una varilla de apisonamiento la cual debe ser:

> Una varilla de acero lisa, redonda y recta de 16 ± 2 mm de diámetro. La longitud de la varilla debe ser al menos 100 mm mayor que la profundidad del molde en el que se realiza el apisonamiento, pero no mayor a 750 mm de longitud total. (ICONTEC, NTC 92, 2019)

El procedimiento para llevar a cabo el ensayo para determinar la masa unitaria suelta consiste en llenar el recipiente con el agregado y determinar su masa, esto se realiza tres veces. Para el caso de la masa unitaria compacta, se debe llenar el molde por capas (3 capas) por cada capa se apisona con 25 golpes con la varilla distribuidos uniformemente; es importante que no se golpee la base del molde. Para las dos capas restantes se debe garantizar un esfuerzo vigoroso garantizando que la varilla no golpee la capa anterior. Seguido a esto, se nivela la superficie del material con el molde y se pesa. Finalmente, por medio de la siguiente ecuación se determina la densidad.

$$M = \frac{G - T}{V} \tag{6}$$

Donde:

M : *Densidad volumétrica del agregado, kg/m^3*

G : *Masa del agregado más el molde, kg*

T : *Masa del molde, kg*

V : *Volumen del molde, m^3*

Escoria de Alto Horno

El acero como el metal más abundante, es usado en construcciones como puentes, edificios, estadios, terminales ferroviarias, y entre otras muchas aplicaciones; es una aleación de hierro, carbono y pequeñas cantidades de otros materiales como lo son fosforo, azufre o magnesio, que por sus propiedades y gracias a la alta resistencia, rigidez y ductilidad que presenta permite diversos usos y ventajas en comparación con otros materiales empleados en la construcción. A través del proceso productivo del material, se generan desperdicios que pueden ser empleados como materia prima para la elaboración de otros materiales y es posible aprovechar las propiedades y características que dicho residuo posee; en el caso de estudio se

busca emplear la escoria (*Figura 13*) como materia prima para la elaboración de mezclas de concreto.

Figura 13. Escoria de alto horno

Fuente: Elaboración propia

En este sentido, el material de reemplazo debe estudiarse y caracterizarse como agregado fino o agregado grueso, según las especificaciones técnicas de la normatividad colombiana, para poder determinar el uso adecuado, la compatibilidad y la aceptación en la mezcla de concreto. En este orden de ideas, los ensayos para la caracterización del material son enunciados en la Tabla 3, para lo cual, se seguirá el proceso y las consideraciones estipuladas para un agregado convencional.

Por otra parte, de acuerdo con la naturaleza de la escoria de alto horno, se hace necesario emplear el material como agregado fino, dada la alta porosidad que posee (**Figura *13***) y puesto que en términos económicos implica el consumo adicional de agua y cemento. Adicionalmente, es importante emplear un método que permita triturar el material con el fin de obtener un conjunto de partículas que se asemejen a un agregado fino convencional para la elaboración de mezclas de concreto, en este sentido, el uso del equipo de la máquina de los ángeles resulta de gran importancia y permite generar un material que cumpla con las condiciones descritas en la norma NTC 77 relacionado con la distribución granulométrica de los agregados.

Cabe resaltar que, en el caso del ensayo para determinar la densidad de la escoria, se requiere caracterizarla a través de la norma técnica colombiana NTC 221, debido a que, si se determina su densidad de acuerdo con el ensayo de densidad de una arena, el ensayo presenta discrepancias dada la flotabilidad que tiene la escoria de alto horno.

Ahora bien, teniendo en cuenta que la escoria de alto horno

> se forma por las reacciones químicas que se generan en el horno entre la materia prima principal (minerales de hierro) y otras sustancias añadidas proceso como carbón coque y fundentes; la composición química de la escoria estará determinada por la materia prima utilizada y su morfología por la manera de enfriamiento una vez salga del alto horno. (Villaquirán Caicedo, Eduard, & Camilo, 2023).

Se necesitarán ensayos adicionales que se enfoquen en el estudio del material y que permitan conocer adecuadamente las propiedades y composición. Así, para la escoria de alto horno se realizará una caracterización como agregado fino, en donde se aplica la normativa (NTC) para dicho tipo de agregado, adicionalmente se desarrolla una caracterización mineralógica, que se basa en los ensayos de fluorescencia de rayos X (XRF), y sirve para identificar los compuestos químicos que componen la escoria de alto horno.

Otro ensayo a realizar para la caracterización y estudio del material que será empleado como reemplazo del agregado en el concreto es: espectroscopía infrarroja. Dichos ensayos serán elaborados por la Universidad Nacional, institución educativa que cuenta con los equipos y herramientas para llevar a cabo los ensayos.

El fundamento de aplicar los ensayos anteriormente mencionados se basa en el hecho que la escoria de alto horno puede variar en su composición de acuerdo con la empresa en la cual fue producido, por lo que es necesario estudiar dichas características en el material que se obtenga de

industrias ubicadas en la capital colombiana y así poder determinar los principales componentes y la aceptación en el uso como material de una mezcla de concreto.

Ensayo para Determinar la Densidad

El procedimiento para determinar la densidad de la escoria se desarrolla siguiendo los parámetros presentados en la norma NTC 221 "Ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico". Para el desarrollo de este ensayo, se hace necesario el uso del frasco de Le Chatelier y kerosene libre de agua.

El procedimiento consiste en agregar al frasco una cantidad de kerosene hasta una marca determinada y se somete a un baño maría hasta lograr los 20°C, posteriormente se agrega, en este caso, la escoria de alto horno, y se saca el aire cuidadosamente, se toma la lectura final después de someterlo de nuevo al baño maría y cuando este se encuentra en las graduaciones finales del frasco. Para calcular la densidad se tiene la siguiente relación:

$$\rho = \frac{Masa\ de\ la\ escoria, gr}{Volumen\ desplazado, cm^3} \qquad (7)$$

Donde:

ρ : *Densidad volumétrica del agregado, g/cm^3*

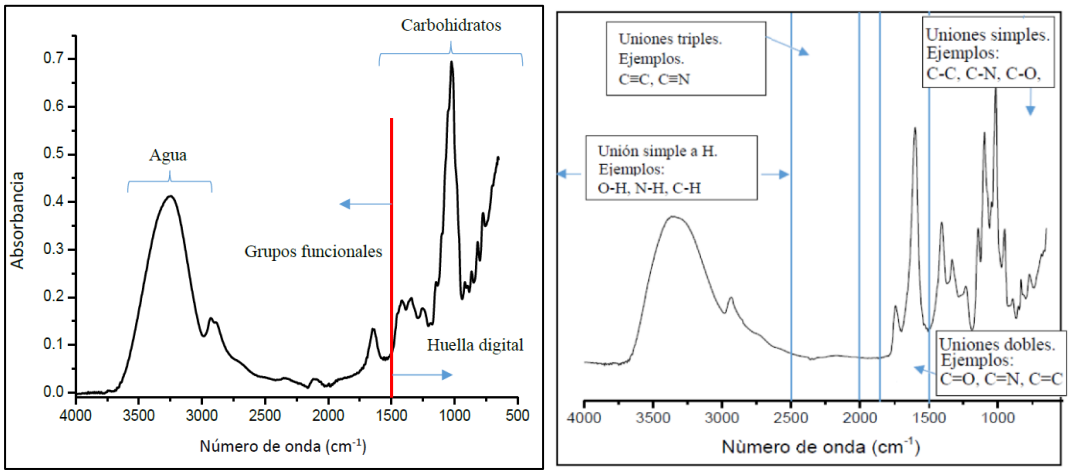
Espectroscopia Infrarroja

La espectroscopia infrarroja es una técnica química que sirve para estudiar la composición molecular de sustancias químicas, en la cual se logran identificar los grupos funcionales que posee un material determinado, de esta manera, "cuando la radiación infrarroja incide sobre una muestra, es capaz de provocar cambios en los estados vibracionales de las moléculas constituyentes de la misma" (Alicante, 2023). En este orden de ideas, la muestra absorbe la radiación infrarroja convirtiéndola en vibraciones moleculares y así, proporciona información acerca de los grupos funcionales que se encuentren en esta misma, también cuantifica la cantidad

de un componente en específico, además, de que identifica y caracteriza materiales como por ejemplo minerales, catalizadores, entre otros.

Los resultados del ensayo proporcionan un espectro de infrarrojo, en el cual se registran en el eje x la intensidad de la radiación infrarroja, en número de onda (cm-1) y en el eje y se encuentra indicada la intensidad de radiación infrarroja absorbida. Básicamente, el espectro consta de una serie de picos (bandas) de absorción, o simplemente picos, los cuales, se ubican a diferentes posiciones y tienen alturas y anchuras diferentes, como se muestra a continuación.

Figura 14. Ejemplo de espectro de infrarrojo y zonas de grupos funcionales



Fuente: Adaptado de https://n9.cl/68rif

De acuerdo con la literatura, un espectro de infrarrojo se divide en dos zonas. La primera, con longitudes de onda entre 4000 y 1500 cm-1, la cual se conoce como la región de huella digital, en dicha región los picos provienen de vibraciones de enlaces presentes en las moléculas. En la segunda zona, los picos que aparecen en la región comprendida entre 1500 y 500 cm-1, son generados por varias vibraciones de enlace presentes en la estructura (o esqueleto) de las moléculas.

Ahora bien, un grupo funcional es aquel que absorbe radiación en un intervalo especifico de frecuencias, independientemente a que este unido en una molécula. En el rango de 4000 a

2500 cm^{-1}, se pueden encontrar enlaces relacionados con O-H, D-H y N-H. Posteriormente, en la región de 2500 a 2000 cm^{-1} comúnmente no se presentan bandas, por lo que no es determinante en el proceso de interpretación. En la banda de 2000 a 1500 cm-1 se presentan los enlaces dobles de vibraciones correspondientes a C=C y C=O. Finalmente, en la región comprendida entre 1500 a 600 cm^{-1}, se presenta un producto de varios tipos de vibraciones de enlace, por lo que es más complejo asignar un grupo funcional específico.

Diseño de la Mezcla de Concreto

El proceso típico para la elaboración de mezclas de concretos se centra en una serie de pasos consecutivos que llevan a conseguir un resultado deseado, los procedimientos pueden variar según el diseñador y la norma de referencia que emplee, y generalmente se usa el proceso descrito por el American Concrete Institute elaborado por el comité ACI 211.1. En términos generales se recomienda el siguiente proceso, el cual se ejecuta una vez sean caracterizados los materiales y se conozcan las propiedades descritas en las normas relacionadas en la Tabla 3, para obtener la cantidad de materiales necesarios para elaborar un metro cubico de concreto.

Establecer los Requisitos

Para realizar la mezcla de concreto se requieren conocer o especificar las condiciones a las que estará expuesta la estructura/cilindros, la resistencia a la compresión mínima necesaria/deseada, tipo de obra a realizar, granulometría de los agregados, tamaño máximo de la grava, densidad aparente de los agregados, absorción, humedad, densidad del cemento, entre otros, los cuales afectan de manera directa en la trabajabilidad, durabilidad y resistencia del concreto.

Determinación de Proporciones

Basado en los requisitos y las propiedades de los materiales, se calculan las proporciones iniciales de cemento, agregados y agua. Con ello se determina, la relación agua-cemento que es

un factor crítico que afecta la resistencia y la durabilidad del concreto, además, de esta relación se deriva la estimación del contenido de agua para la mezcla, masa de Cemento y el contenido de agregados. Cabe resaltar, que la relación agua-cemento evita la segregación del concreto y mejora la compacidad de este.

Diseño preliminar, Ajuste y Optimización

De acuerdo con los resultados obtenidos anteriormente, se ajustan las proporciones para lograr una combinación óptima de los materiales (agregado grueso, agregado fino, agua, cemento y aire) de la mezcla de concreto, cumpliendo con los requisitos de resistencia, durabilidad y trabajabilidad. Para lo anterior, se ajusta la cantidad de agua por el contenido de humedad de los agregados y una vez realizada la mezcla de concreto se lleva a cabo el ensayo de asentamiento para realizar las respectivas correcciones de las masas requeridas de cada material (agua, agregados, cemento)

Verificación de Desempeño y Documentación

Se realizan pruebas de resistencia en muestras de concreto expuestas a condiciones de laboratorio, evaluando cómo se comporta la mezcla en condiciones del mundo real, de tal forma que cumpla con los estándares establecidos y deseados. Junto con las pruebas, se documentan las proporciones y detalles del diseño de mezcla para concluir a posteriori.

Elaboración de Cilindros en Concreto

Definición de la Cantidad de Muestras

La definición de la cantidad de cilindros a realizar será de acuerdo con lo indicado en las normas NTC 550 y 454, que relaciona la toma de muestras de concreto. En este orden de ideas, la cantidad de cilindros a elaborar se calcula teniendo en cuenta que la norma indica un tamaño de muestra “mínima de 28 litros si se va a fabricar especímenes para ensayos de resistencia” (ICONTEC, NTC - 454, 2022), de tal forma que se obtiene un total de 5 muestras según el

tamaño del espécimen de concreto (cilindro) indicado en la norma (150mm de diámetro y 300mm de altura).

Por otra parte, se realizarán mezclas con porcentajes de reemplazo de material del 0%, 5%, 10%, 15% y 20%, para comparar la influencia que tiene la escoria en la mezcla en función de la participación de esta.

Preparación de Muestras

Se preparan las muestras de concreto de acuerdo con el diseño de mezcla explicado anteriormente y teniendo en cuenta que se debe obtener un volumen necesario para elaborar cinco (5) cilindros de cada una de las proporciones de reemplazo de material, para ello se emplean moldes de cilindros con dimensiones ya especificadas en el numeral anterior. Por otra parte, inmediatamente después del vertido el concreto se deben compactar y nivelar adecuadamente las muestras de acuerdo con la NTC 550.

Curado del Concreto

El curado comienza tan pronto como sea posible, después de que las muestras se hayan colocado en los moldes y una vez han alcanzado la consistencia deseada. Esto generalmente se hace después del desmolde, que se lleva a cabo, veinticuatro (24) horas después de la fundida, aislándolas de condiciones ambientales fuertes y variantes.

Para el curado, es necesario sumergir las muestras en agua con cal durante 28 días para controlar la humedad y la temperatura y con el fin de alcanzar la resistencia deseada del concreto diseñado y elaborado. Esto para asegurar que las muestras se mantengan húmedas durante el período de curado. Adicionalmente, es necesario evitar cambios bruscos de temperatura. Para este procedimiento se considera la NTC 550.

Elaboración de Ensayos a Cilindros

Luego de tener las muestras de los cilindros realizados con materiales comunes y con el reemplazo del agregado por la escoria de alto horno, se realizarán ensayos para determinar la resistencia del concreto, con el fin de dar alcance al objeto del trabajo de grado y, por tanto, definir la influencia que posee la escoria dentro de la mezcla de concreto en varias proporciones.

Ensayo de compresión

El ensayo de resistencia a la compresión se realiza de acuerdo con las especificaciones de la norma NTC 673 (ASTM C39 y ACI 318), para así, poder determinar la calidad del concreto y la capacidad de soportar cargas, factor determinante dentro de los requisitos del comportamiento del concreto. Para este ensayo, los cilindros deben estar limpios y secos antes de las pruebas, así mismo, se debe asegurar la uniformidad en la parte superior e inferior para garantizar una distribución uniforme de la carga, consecuentemente se aplica una carga axial de compresión gradual y constante, hasta que falle. Al fallar el cilindro, se considera la carga máxima que soporto, para calcular la resistencia a la compresión y observar si cumple con las especificaciones de diseño.

Desarrollo de la propuesta

Para llevar a cabo el desarrollo de la propuesta, primero se procede a definir los parámetros iniciales de la obra, bajo la cual se someterán los cilindros de concreto a elaborar y para la cual se define la resistencia a la compresión y las características básicas de la mezcla. Para este caso los datos correspondientes se establecen a continuación:

Tabla 8. Características generales para diseño de mezcla

Información	Datos	
Tipo de obra	Losas medianamente reforzadas y pavimentos, compactados a mano. Columnas, vigas, fundaciones y muros, con vibración.	
Grado de severidad	Mediano	
Resistencia a la compresión	21 MPa (3000 psi)	
Tipo de cemento	Tipo 1	
Peso específico del cemento	3,1	g/cm3
Aditivos para el concreto	Sin aditivos	

Fuente: Elaboración propia

Una vez definidos los parámetros iniciales con los cuales se realizará el diseño y la mezcla de concreto, se procede con la consecución del agregado fino (arena) y el agregado grueso (grava), de la empresa “Costrurama” de conformidad con lo establecido en la metodología, para realizar los respectivos ensayos de caracterización ya mencionados en el inciso 7.3 de la metodología de trabajo.

Caracterización de los materiales

Agregado fino y grueso

Granulometría

Una vez desarrollado el procedimiento descrito en la metodología, para llevar a cabo el proceso de tamizado a fin de obtener la granulometría de los agregados en función de la norma NTC 77, se obtienen los resultados mostrados a continuación.

Para el caso de la granulometría de la arena, se obtienen los siguientes datos posterior al ejercicio de tamizado y pesado de material.

Tabla 9. Datos ensayo de granulometría de la arena.

Tamiz		Arena			
Pulgadas	Milímetros	Peso retenido (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
3/8	9.51	0	0.0	0.0	100.0
N4	4.76	98.3	4.9	4.9	95.1
N8	2.38	101.1	5.1	10.0	90.0
N16	1.19	144.5	7.2	17.2	82.8
N30	0.595	432	21.6	38.8	61.2
N50	0.297	649.5	32.5	71.3	28.7
N100	0.149	538.7	26.9	98.3	1.7
N200	0.075	25.7	1.3	99.5	0.5
Fondo	-	9.2	0.5	100.0	0.0
Total		1999			

Fuente: Elaboración propia

Para para el caso de la grava se escoge una masa inicial de 10 kg dado que el tamaño máximo nominal que se tiene es de ¾” (19 mm) cumpliendo según las especificaciones de la *Tabla 4*.

Tabla 10. *Datos ensayo de granulometría agregado grueso.*

Tamiz		Grava			
Pulgadas	Milímetros	Peso retenido (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
1	25.4	0	0.0	0.0	100.0
3/4	19.1	0	0.0	0.0	100.0
1/2	12.5	0	0.0	0.0	100.0
3/8	9.51	127.7	1.3	1.3	98.7
N4	4.76	2192.4	22.0	23.3	76.7
Fondo	-	2636.9	26.4	49.7	50.3
Total			4834.4	48.5	98.2

Fuente: Elaboración propia

Densidad y absorción del agregado fino

Para el caso del ensayo de densidad y absorción de la arena se realiza el procedimiento descrito en la norma NTC 237. Para ello, se tomó una muestra de material, se secó, se sumergió en agua y se decantó el exceso de agua, es necesario garantizar la condición saturada superficialmente seca, esto se evidencia a través del ensayo de cono para humedad superficial (Ver Figura 15).

Figura 15. *Ensayo de cono para humedad superficial de la arena*

Fuente: Elaboración propia.

Con el material debidamente preparado y el procedimiento desarrollado, los datos iniciales para este ensayo se evidencian en la *Tabla 11*. Seguido a lo anterior, se procede a calcular la densidad y absorción a través de la Ecuación 1 y Ecuación 2 respectivamente.

Tabla 11. *Datos ensayo densidad y absorción de la arena.*

Datos iniciales arena		
W picnómetro	286.88	gramos
W picnómetro + agua	1283.8	gramos
W material	500	gramos
W picnómetro + agua + material	1591.8	gramos
W seco	493.9	gramos

Fuente Elaboración propia.

Los cálculos para cada parámetro se muestran a continuación:

$$D_{ap} = \frac{493.9}{1283.8 + 500 - 1591.8} = 2.57\,\frac{gr}{cm^3} \qquad ; \qquad \%\,Absorción = \left[\frac{500 - 493.9}{500}\right] \cdot 100 = 1.24\%$$

Densidad y absorción del agregado grueso

Se realiza el ensayo de densidad y absorción del agregado grueso como se explicó en la metodología bajo la norma NTC 176, es decir, se sumerge la muestra durante 24 horas, luego se obtiene la condición superficialmente seca y finalmente se seca al horno, para lo cual se tienen los siguientes datos:

Tabla 12. *Datos ensayo densidad y absorción grava.*

Datos iniciales grava		
TMN	1 "	
W sss	2069.9	gramos
W sumergido	1276.1	gramos
W seco	2019.8	gramos

Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, haciendo uso de las ecuaciones (3) y (4) se calcula la densidad y absorción respectivamente.

$$D_{ap} = \frac{2019.8}{2069.9 - 1276.1} = 2.54 \frac{gr}{cm^3} \quad ; \quad \%\, Absorción = \left[\frac{2069.9 - 2019.8}{2019.8}\right] \cdot 100 = 2.48\%$$

Contenido de humedad de los agregados

Para el ensayo de humedad de la grava, se procedió a lavarla y luego a secarla en condiciones naturales, y luego se realizó el ensayo según la norma NTC 1776. Los datos iniciales se muestran a continuación:

Tabla 13. *Datos ensayo de humedad de la grava.*

Datos grava	Peso	
W lata	605.5	gramos
W material	1858	gramos
W material seco + lata	2456.4	gramos
W material seco	1850.9	gramos

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a la arena, los datos se relacionan en la *Tabla 14*.

Tabla 14. *Datos ensayo de humedad de la arena.*

Datos arena	Peso	
W lata	828.5	gramos
W material	1085	gramos
W material seco + lata	1884.1	gramos
W material seco	1055.6	gramos

Fuente: Elaboración propia

El cálculo de la humedad para los dos agregados se realiza a través de la Ecuación 5, de la siguiente manera.

$$Humedad\ Grava = \frac{1858 - 1850.9}{1850.9} = 0.38\% \quad ; \quad Humedad\ Arena = \frac{1085 - 1055.6}{1055.6} = 2.79\%$$

Masa unitaria de los agregados

Para la masa unitaria se sigue el procedimiento descrito en la norma NTC 92, explicado en la metodología, para este caso los datos obtenidos en el laboratorio para el agregado grueso se muestran en la *Tabla 15*.

Tabla 15. *Datos ensayo de masa unitaria de la grava.*

	Datos Grava		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Material Suelto	W material + molde	(gr)	17033	17069	17287
	W molde	(gr)	4052	4052	4052
	Volumen	(cm^3)	9472.85	9472.85	9472.85
Material Compacto	W c + m	(gr)	18415	18418	18205
	W mol	(gr)	4052	4052	4052
	Volumen	(cm^3)	9472.85	9472.85	9472.85

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de la arena, los datos iniciales obtenidos en la práctica de laboratorio se observan en la siguiente tabla.

Tabla 16. *Datos ensayo de masa unitaria de la arena.*

	Datos Arena		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Material Suelto	W material + molde	(gr)	9862	9888	9903
	W molde	(gr)	5578.5	5578.5	5578.5
	Volumen	(cm^3)	3217	3217	3217
Material Compacto	W c + m	(gr)	10278	10293	10291
	W mol	(gr)	5578.5	5578.5	5578.5
	Volumen	(cm^3)	3217	3217	3217

Fuente: Elaboración propia

Es de resaltar que, para calcular la masa unitaria suelta y compacta de los agregados grueso y fino, se hace uso de la Ecuación 6, por ejemplo, para la muestra 1 de la grava en el caso del material suelto es de la siguiente manera:

$$M = \frac{17033 - 4052}{9472{,}85} = 1.370 \frac{gr}{cm^3}$$

Una vez obtenido el peso unitario para cada una de las muestras y para el caso del material suelto y compacto, se promedian los valores para obtener el resultado del ensayo, lo anterior se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 17. *Resultados ensayo de peso específico*

Ensayo	Materia	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
Material suelto	Grava	1.370	1.374	1.397	1.38
	Arena	1.332	1.340	1.344	1.34
Material compacto	Grava	1.516	1.517	1.494	1.51
	Arena	1.461	1.465	1.465	1.46

Fuente: Elaboración propia

Nota: Valores en gr/cm³

Resumen de la caracterización de los agregados

En resumen, los datos de los ensayos para el agregado grueso se relacionan en la siguiente tabla:

Tabla 18. *Resumen de caracterización de la grava.*

Información	Datos	
Peso unitario suelto	1.38	gr/cm^3
Peso unitario compacto	1.51	gr/cm^3
Peso específico aparente	2,54	g/cm^3
Absorción	2,48	%
Humedad	0.38	%

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, los datos del agregado fino (arena), se relacionan a continuación:

Tabla 19. *Resumen de caracterización de la arena.*

Información	Datos	
Peso unitario suelto	1.34	gr/cm^3
Peso unitario compacto	1.46	gr/cm^3
Peso específico aparente	2,57	g/cm^3
Absorción	1,24	%
Humedad	2.79	%

Fuente: Elaboración propia

Escoria de alto horno

Para el caso de la escoria, se procedió a conseguir la escoria de alto horno y debido a su gran tamaño, está debió ser triturada (Ver Figura 16) hasta obtener un tamaño adecuado de las partículas; proceso que se realizó en la máquina de los ángeles y luego se tamizó para caracterizarla como un agregado fino.

Figura 16. *Escoria de alto horno triturada*

Fuente: Elaboración propia.

Granulometría de la escoria

Para el caso de la granulometría de la escoria, debido a que dentro de los múltiples procesos de trituración no se establece un patrón de comportamiento similar en cada tamizado llevado a cabo, y teniendo en cuenta que la distribución granulométrica no es uniforme y conforme con la normatividad, no es posible realizar el ensayo de granulometría convencional, puesto que el material no cumple con las especificaciones de la norma.

Debido a lo anterior, las condiciones de granulometría se determinan cumpliendo con los requerimientos establecidos para un agregado fino en la norma técnica colombiana NTC 174 y NTC 77. Por ende, la granulometría establecida se muestra en la siguiente tabla, la cual se establece en función de los limites mínimo y máximo, de tal forma que se “arma” la granulometría.

Tabla 20. *Datos ensayo de granulometría de la escoria.*

Tamiz		Arena			
Pulgadas	Milímetros	Peso retenido (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
3/8	9.51	0	0	0	100
N4	4.76	75	5	5	95
N8	2.38	135	9	14	86
N16	1.19	240	16	30	70
N30	0.595	300	20	50	50
N50	0.297	330	22	72	28
N100	0.149	300	20	92	8
N200	0.075	102	6.8	98.8	1.2
Fondo	-	18	1.2	100	0
Total			1500		

Fuente: Elaboración propia

En este sentido, partiendo de los porcentajes pasa de la tabla anterior y para el peso de material que sea requerido en cada diseño de mezcla, se determinará el peso retenido en cada tamiz para que la conformación de la escoria de cumplimiento a lo establecido en la normatividad.

Densidad y absorción de la escoria

El ensayo de la absorción de la escoria de alto horno se realizó siguiendo el procedimiento de la norma técnica colombiana NTC 237, donde se debe garantizar la condición saturada superficialmente seca, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 17*. Ensayo de cono para humedad superficial de la escoria*

Fuente: Elaboración propia

Una vez realizados los procedimientos establecidos en la metodología, los datos iniciales obtenidos en el laboratorio para este ensayo se muestran a continuación:

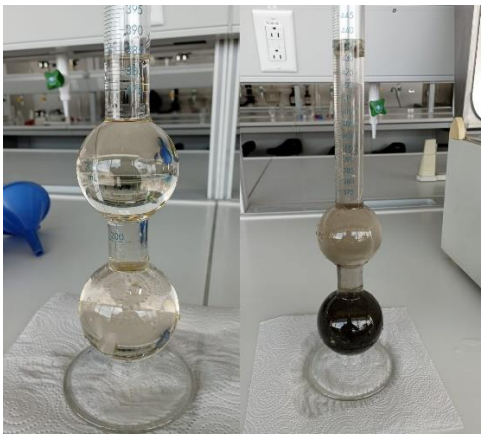
Tabla 21. *Datos ensayo de absorción de la escoria.*

Información	Datos	
Peso seco	275	gr
Peso saturado superficialmente seco	276,2	gr

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, para el caso de la densidad se realiza el procedimiento descrito en la NTC 221, dadas las características de la escoria, en cuyo caso, el comportamiento del material hace necesario emplear el procedimiento de la determinación de la densidad para un cemento, como se evidencia en la siguiente figura.

Figura 18. *Ensayo de densidad de la escoria de alto horno.*



Fuente: Elaboración propia

Los datos iniciales obtenidos luego de realizar el ensayo se muestran a continuación:

Tabla 22. *Datos ensayo de densidad de la escoria.*

Información	Datos	
Peso material	119	gr
Volumen inicial	384	ml
Volumen final	437	ml

Fuente: Elaboración propia

Con la información anterior, y por medio de la Ecuación 7 y Ecuación 2 se determina la densidad y absorción de la escoria, como se muestra a continuación.

$$D_{ap} = \frac{119}{437 - 384} = 2.25 \frac{gr}{cm^3} \quad ; \quad \% \, Absorción = \left[\frac{276{,}2 - 275}{275}\right] \cdot 100 = 0.44\%$$

Contenido de humedad de la escoria

En el caso del contenido de humedad y en función de las características del material en estado natural, se establece que el valor corresponde a 0%, toda vez que el material permanece seco en condición normal y permite realizar el tamizado sin la necesidad de secar la escoria en horno durante 24 horas a una temperatura constante, por lo tanto, se identifica que no existe humedad en el material y por consiguiente su valor es nulo.

Masa unitaria de la escoria

Ahora bien, para el ensayo de masa unitaria se sigue el procedimiento explicado en la norma NTC 92. Para este caso los datos obtenidos en el laboratorio para la escoria de alto horno se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 23. *Datos* ensayo de masa unitaria de la escoria.

	Datos Escoria		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Material Suelto	W material + molde	(gr)	8478.4	8622.2	8386.3
	W molde	(gr)	5578.5	5578.5	5578.5
	Volumen	(cm3)	3217	3217	3217
Material Compacto	W c + m	(gr)	9008	9037.9	9033
	W mol	(gr)	5578.5	5578.5	5578.5
	Volumen	(cm3)	3217	3217	3217

Fuente: Elaboración propia

A partir de la Ecuación 6 y los datos de la tabla anterior, se obtiene que el peso unitario suelto de la escoria es de 0.91 gr/cm^3 y el peso unitario compacto es de 1.07 gr/cm^{3,} recordando que dichos valores se obtienen del promedio de los resultados para cada una de las muestras.

Resumen de la caracterización de la escoria

En resumen, los datos de la escoria de alto horno se relacionan en la *Tabla 24* .

Tabla 24. Resultados de caracterización de la escoria.

Información	Datos	
Peso unitario suelto	0,91	gr/cm^3
Peso unitario compacto	1,07	gr/cm^3
Peso específico aparente	2,25	gr/cm^3
Humedad	0,0	%
Absorción	0,44	%

Fuente: Elaboración propia

Espectroscopia de infrarrojos

El ensayo de espectroscopia realizado a una muestra de escoria de alto horno triturada arroja la siguiente gráfica obtenida de los datos crudos, con lo cual se pueden identificar los grupos funcionales que se encuentran presentes en el material. Para el ensayo de espectro infrarrojo IR, los resultados crudos se encuentran en los anexos del documento.

Figura 19. *Resultados espectroscopía de infrarrojos*

Fuente: Universidad Nacional

Fluorescencia de rayos x

Los resultados obtenidos del ensayo de fluorescencia de rayos x desarrollado por la Universidad Nacional, se presentan en la siguiente tabla, en la cual se consignan los compuestos que se identificaron en el laboratorio.

Tabla 25. *Resultados ensayo de fluorescencia de rayos x*

Compuesto	Cantidad		Compuesto	Cantidad	
Na_2O	1.005	%	Fe_2O_3	1.910	%
MgO	0.420	%	Co_3O_4	65.40	ppm
Al_2O_3	12.935	%	NiO	13.40	ppm
SiO_2	68.391	%	Pb	25.70	ppm
P_2O_5	0.401	%	CuO	40.30	ppm
SO_3	0.266	%	ZnO	31.00	ppm
Cl	471.5	ppm	Rb_2O	20.30	ppm
K_2O	0.360	%	SrO	137.20	ppm
CaO	13.197	%	ZrO_2	217.30	ppm
TiO_2	0.402	%	Nb_2O_5	267.10	ppm
V_2O_5	82.40	ppm	ThO_2	4.000	ppm
Cr_2O_3	335.2	ppm	UO_2	154.00	ppm
MnO	0.525	%	Br	414.231	cps

Fuente: Elaboración propia

Diseño de la mezcla de concreto

Se realiza el diseño de la mezcla de concreto, conforme se establece en el numeral 7.4. del presente trabajo y en función de lo estipulado por el ACI 211.1. Ahora bien, para la elaboración del diseño con reemplazo de material en proporciones de 5%, 10%, 15% y 20%, se propone realizar dos diseños de mezcla independientes; el primer diseño se elaborará con la arena y el segundo diseño se realiza con la escoria, es decir, se consideran las propiedades de cada material de forma independiente para la determinación de las cantidades de materiales, de tal forma que se obtienen dos diseños de mezcla para elaborar un metro cubico de concreto con escoria y con arena. Posteriormente se combinan los dos diseños, calculando en porcentajes de masa cada uno

de los componentes (arena, grava, agua y cemento) con el fin de combinar en porcentajes de participación los dos diseños obtenidos.

Procedimiento Preliminar de Dosificación

Elección del Asentamiento

El asentamiento se encuentra en función del tipo de estructura, la consistencia y el grado de trabajabilidad, y teniendo en cuenta que para este caso se tienen "Losas medianamente reforzadas y pavimentos, compactados a mano. Columnas, vigas, fundaciones y muros, con vibración", el valor del asentamiento se encuentra entre 5 y 10 cm (ver Figura 20). Ahora bien, para obtener una mezcla con una adecuada trabajabilidad y que no presente problemas en la compactación se adoptara un asentamiento de 8 cm.

Elección Tamaño Máximo Nominal – TMN

El tamaño máximo nominal es el tamaño de la malla más pequeño por el que pasa la mayor cantidad de agregado grueso. Para este caso, se observa en la Tabla 10 que la mayor cantidad de material que pasa es por el tamiz ¾" con un 98.72%.

Estimación del Contenido de Aire:

Para estimar el contenido de aire, se debe considerar el tamaño máximo nominal seleccionado y el grado de exposición de la estructura; que para este caso es mediano, por ende, se tiene un promedio total de aire del 5%, de los cuales aproximadamente el 2% son aire atrapado (ver Figura 21). Dado el porcentaje de aire estimado, se determina que el volumen de aire en la mezcla de concreto equivale a 0,020 m^3/m^3 (metros cúbicos por cada metro cúbico de concreto).

Figura 20. *Tablas para la selección del asentamiento y contenido de agua*

Tabla 11.1 - Valores de asentamiento [cm] recomendados para diversas clases de construcción					
Mínimo	Medio	Máximo	Consistencia	Grado de trabajabilidad	Tipo de estructura y condición de colocación
0	1	2	Muy seca	Muy pequeño	Vigas o pilotes de alta resistencia
2	2.75	3.5	Seca	Pequeño	Pavimentos vibrados con maquina
3.5	4.25	5	Semi seca	Pequeño	Construcciones en masas voluminosas
5	7.5	10	Media	Medio	Columnas, vigas, fundaciones y muros
10	12.5	15	Húmeda	Alto	Secciones con mucho refuerzo

Tabla 11.3 - Contenido aproximado de aire en el concreto					
Agregado grueso		% prom. Total de aire según de exposición			-
Pulg	mm	Suave	Mediano	Severo	Porcentaje promedio aprox. De aire atrapado
3/8"	9.51	4.5	6	7.5	3
1/2"	12.5	4	5.5	7	2.5
3/4"	19.1	3.5	5	6	2
1"	25.4	3	4.5	6	1.5
1 1/2"	38.1	2.5	4.5	5.5	1
2"	50.8	2	4	5	0.5
3"	76.1	1.5	3.5	4.5	0.3
6"	152.4	1	3	4	0.2

Fuente: Adaptado de ACI 211.1

Estimación de la cantidad de agua de mezclado (a):

La estimación del contenido de agua por metro cúbico de concreto está en función del asentamiento, el TMN de los agregados y del contenido de aire de la mezcla, en cuyo caso no posee aire incluido. Dichos valores se deben corregir de acuerdo con los valores de absorción y humedad de los agregados

Figura 21. *Tabla para la estimación del contenido de agua.*

Requerimiento aprox. De agua de mezclado para diferentes Asentamientos y TMN del agregado									
Condición del contenido de aire	-	Agua en kg/m3 de concreto para los TMN indicados							
	Asentamiento	10	12.5	20	25	40	50	70	150
		3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
Concreto sin aire incluido	3 a 5	205	200	185	180	160	155	145	125
	8 a 10	225	215	200	195	175	170	160	140
	15 a 18	240	230	210	205	185	180	170	-
Concreto con aire incluido	3 a 5	180	175	165	160	145	140	135	120
	8 a 10	200	190	180	175	160	155	150	135
	15 a 18	215	205	190	185	170	165	160	-

Fuente: Adaptado de ACI 211.1

En este sentido, la cantidad de agua corresponde a 200 kg⁄m^3 o lo que equivale en volumen a 0,200 m^3⁄m^3, partiendo que la densidad del agua es de 1000 kg/m^3

Elección de la relación agua/cemento (a/c)

Para determinar la relación agua/cemento se debe tener en cuenta la resistencia a la compresión y durabilidad del concreto. Para este caso, la resistencia a la compresión establecida es de 21MPa o 210 kg/cm^2, y dado el procedimiento del diseño de mezcla se realiza una corrección sumando 85kg/cm^2, obteniendo una resistencia a la compresión de 295 kg/cm^2 a los 28 días, por ende, la relación a/c para la resistencia a la compresión establecida y un concreto sin inclusor de aire, se tiene que es de 0,45 (Se interpola la información de la figura).

Figura 22. *Tabla de relación entre F'c y a/c*

Tabla 11.5 - Relación entre F'c y la relación a/c				
Mpa	kg/cm2	psi	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
17	175	2500	0.65	0.56
21	210	3000	0.58	0.5
24	245	3500	0.52	0.46
28	280	4000	0.47	0.42
31	315	4500	0.43	0.38
35	350	5000	0.4	0.35

Fuente: Adaptado de ACI 211.1

Cálculo del contenido de cemento (c): Para calcular el contenido de cemento (c) en masa, es necesario conocer la cantidad de agua (a) y la relación agua cemento (a/c); parámetros que ya se conocen de los pasos anteriores, y a través del cociente de estos valores, se estima la cantidad de cemento por metro cúbico de concreto, conforme la siguiente expresión.

$$c = \frac{a}{a/c} \tag{8}$$

$$c = \frac{200kg}{0{,}45} = 441{,}64 \text{ kg}$$

Y el volumen que ocupará esta masa de cemento para un metro cubico de concreto será obtenida a partir de la relación entre la masa y el volumen del material:

$$v_c = \frac{m_c}{\rho_c} = \frac{441{,}64kg}{3100\, kg/m^3} = 0{,}142m^3$$

Consolidación de la información: En resumen, se tienen los siguientes datos para el diseño de las mezclas de concreto a fabricar con arena y escoria:

Tabla 26. *Datos preliminares diseño de mezcla*

Información	Datos
Asentamiento	8 cm
Tamaño máximo nominal TMN	¾”
Contenido de aire	0,020 m^3/m^3
Contenido de agua de mezclado (a)	0,200 m^3/m^3
Relación agua/cemento (a/c)	0,45
Contenido de cemento	0,142 m^3

Fuente: Elaboración propia

Cabe resaltar que los datos que se evidencia en la *Tabla 26* son los mismos que se tendrán en cuenta para los dos diseños de mezcla donde el método de diseño que se utilizará es el método ACI 211.1. Hasta ahora, no se ha considerado la escoria y/o arena para los diseños.

Verificación especificaciones granulométricas

Grava: Realizando la comparación con respecto a los límites establecidos para el agregado grueso, según la norma técnica colombiana NTC 174, cuyas condiciones son expuestas en la *Tabla 6* y la Tabla 5. Límites granulométricos agregado fino se obtiene que:

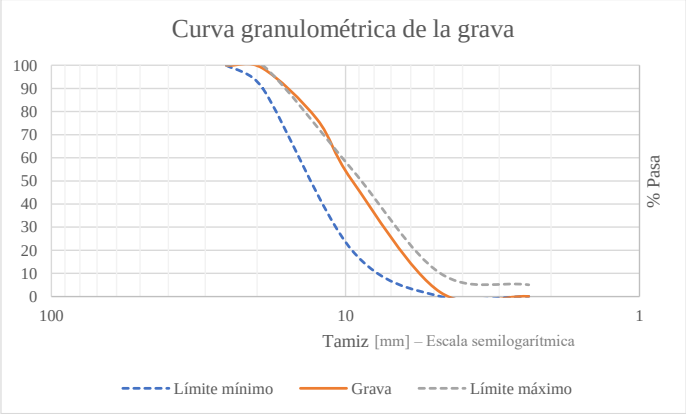
Tabla 27. *Verificación limites agregado grueso según NTC 174.*

Tamiz		Límite	Límite	A comparar (%)	Verificación
Pulgadas	Milímetros	mínimo (%)	máximo (%)		
1	25.4	100	100	100	OK
3/4	19.1	90	100	98.720	OK
1/2	12.5	-	-	76.736	--
3/8	9.51	20	55	50.296	OK
N4	4.76	0	10	1.821	OK

Fuente: Elaboración propia

La siguiente figura muestra la curva granulométrica para los porcentajes pasa obtenidos en la Tabla 27. Donde se confirma que la grava cumple con todos los estándares establecidos para un tamaño máximo de 1”.

Figura 23. *Curva granulométrica del agregado grueso*



Fuente: Elaboración propia

Arena: Para el caso de la arena, la comparación se observa a continuación, según las especificaciones que plantea la norma técnica colombiana NTC174, cuyos requerimientos se muestran en la *Tabla 5* y que a continuación son contrastados para verificar el cumplimiento de la granulometría del material a usar en el diseño de la mezcla de concreto.

Tabla 28. *Verificación limites agregado fino (arena) según NTC 174.*

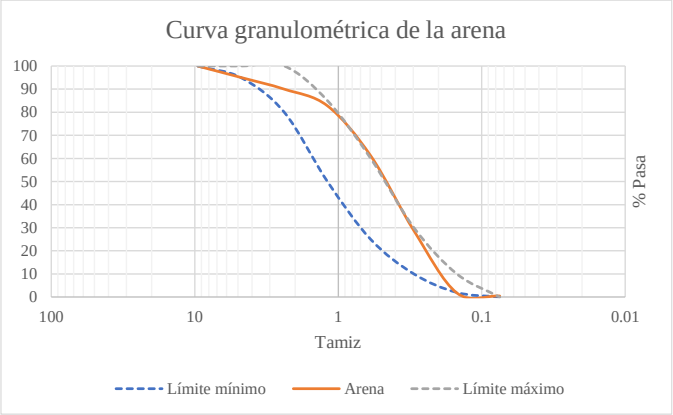
Tamiz		Límite mínimo (%)	Límite máximo (%)	A comparar (%)	Verificación
Pulgadas	Milímetros				
3/8	9.51	100	100	100.00	OK
N4	4.76	95	100	95.08	OK
N8	2.38	80	100	90.03	OK
N16	1.19	50	85	82.80	OK
N30	0.595	25	60	61.19	NO[1]
N50	0.297	10	30	28.69	OK
N100	0.149	2	10	1.75	NO[2]
N200	0.075	-	-	0.46	-

Fuente: Elaboración propia

[1] Debido a que el porcentaje a comparar excede por poco al límite máximo, se acepta para el diseño de mezcla.

[2] Dado que se tiene un concreto sin aire incorporado y un contenido de cemento mayor a 297 kg/m^3, la NTC 174 plantea que el porcentaje del límite mínimo puede reducirse al 0%, por ende, la arena cumple con el porcentaje pasa en el tamiz N100.

Figura 24. *Curva granulométrica del agregado fino; arena*



Fuente: Elaboración propia

Si bien, los valores establecidos para los tamices N30 y N100 no cumplen exactamente con las especificaciones granulométricas para la arena, las desviaciones de los mismos no son superiores al 2%, por lo cual, se considerará que la arena se puede emplear como agregado fino para la mezcla.

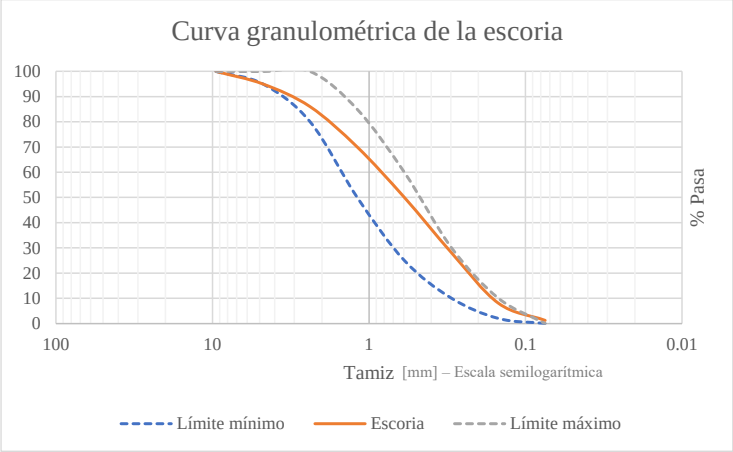
Escoria: Por otro lado, las especificaciones granulométricas de la escoria se presentan a continuación, en donde se identifica que los valores seleccionados en el inciso de la caracterización de los materiales. cumplen con los rangos requeridos.

Tabla 29. *Verificación limites agregado fino (escoria), según NTC 174.*

Tamiz		Límite	Límite	A comparar	Verificación
Pulgadas	Milímetros	mínimo (%)	máximo (%)	(%)	
3/8	9.51	100	100	100.00	OK
N4	4.76	95	100	97.00	OK
N8	2.38	80	100	91.00	OK
N16	1.19	50	85	65.00	OK
N30	0.595	25	60	41.00	OK
N50	0.297	10	30	18.00	OK
N100	0.149	2	10	6.00	OK
N200	0.075	-	-	1.20	-

Fuente: Elaboración propia

***Figura 25**. Curva granulométrica del agregado fino; escoria*



Fuente: Elaboración propia

Determinación de Proporciones Mezcla Normal

Estimación del Contenido de Agregados:

Para determinar el contenido de agregados, se debe determinar el módulo de finura del agregado fino; este se calcula como la suma del tamiz 3/8 hasta el tamiz N100 divido en cien, obteniendo que el módulo de finura es 2,4.

De acuerdo con el módulo de finura se determina el volumen de gravilla por unidad de volumen de concreto (*b/bo*), según el método ACI estos volúmenes se estiman a través de relaciones empíricas mostradas en la, las cuales cumplen con la granulometría recomendada según la norma NTC 174, por ende, el valor de la relación de volúmenes *b/bo* para un módulo de finura de 2,4 y un TMN de ¾ es de 0,66.

Figura 26. *Tabla volumen de grava por m3 de concreto*

Tabla 11.9 - Volumen de gravilla por unidad de volumen de concreto (b/bo)					
TMN		Modulo de finura			
pulg	mm	2.4	2.6	2.8	3
3/8"	9.51	0.5	0.48	0.46	0.44
1/2"	12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	19.1	0.66	0.64	0.62	0.6
1"	25.4	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2"	38.1	0.75	0.73	0.71	0.69
2"	50.8	0.78	0.76	0.74	0.72
3"	76.1	0.82	0.8	0.78	0.76
6"	152.4	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: Adaptado de ACI 211.1

Ahora bien, para conocer el volumen de agregado grueso por metro cubico de concreto B, se puede estimar a través de la siguiente relación:

$$B = (b/bo) \times bo' \qquad (9)$$

Donde:

B : Volumen de grava por metro cubico de concreto

b/bo : Volumen de grava por unidad de volumen de concreto

bo' : Volumen de partículas de agregado grueso por metro cubico de agregado grueso

El volumen de partículas de agregado grueso por metro cubico de agregado grueso se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$bo' = \frac{Masa\ unitaria\ compacta\ grava}{Densidad\ aparente\ grava} \qquad (10)$$

De este modo, aplicando la relación:

Ecuación 9 y Ecuación 10 con la relación *b/bo=0.66* y los datos de la Tabla 18, se tiene que:

$$\boldsymbol{B = (0,66) \times \frac{1,51\ g/cm^3}{2,54\ g/cm^3} = 0.392\ m^3}$$

Por ende, el volumen de agregado grueso por metro cubico de concreto B es 0,392 m^3.

Por otro lado, para calcular el volumen de arena por metro cubico de concreto, se calcula a través

de la resta de los distintos componentes del concreto calculados anteriormente (Tabla 26 y B), de este modo de tiene que el volumen de arena por metro cubico de concreto es de 0,246 m^3. En resumen, se tiene lo siguiente:

Tabla 30. *Resumen previo de cantidades del diseño de mezcla.*

Material	Volumen [m3/m3]	Densidad aparente [g/cm3]	Peso [kg/m3]
Agua	0.200	1	200.000
Aire	0.020	-	0
Cemento	0.142	3.100	441.640
Agregado grueso	0.391	2.544	995.193
Agregado fino	0.246	2.572	633.877
Total	1.00	-	2270.711

Fuente: Elaboración propia

Nota: Los valores obtenidos en la anterior tabla no tienen en cuenta la humedad y absorción de los agregados. Se debe hace una corrección.

Ajuste por humedad de los agregados

Dado que las partículas del agregado contienen porosidad, estas retienen cierto nivel de humedad y absorben agua, que deben ajustarse añadiendo o sustrayendo del total de agua utilizado, para optimizar la mezcla de concreto. En este orden de ideas, se utilizan fórmulas específicas para calcular la corrección por humedad y determinar el peso de los agregados con humedad, teniendo en consideración que estos cálculos se realizan para un volumen de un metro cúbico de concreto.

Pesos húmedos de los agregados

Para calcular los pesos húmedos se emplea la siguiente formula:

$$M_h = M(1 + H) \qquad (11)$$

Donde:

M : Peso de la muestra seca para un metro cúbico de concreto

H : Humedad del agregado grueso o fino

Por tanto, para la grava y arena se tiene respectivamente

$$M_{hg} = 995{,}193\ kg * (1 + 0{,}0038) = 999{,}011\ kg$$

$$M_{hj} = 633.877\ kg * (1 + 0{,}0279) = 651{,}532\ kg$$

En donde, los datos son obtenidos de la Tabla 18. Resumen de caracterización de la grava., Tabla 19. Resumen de caracterización de la arena., y Tabla 30. Resumen previo de cantidades del diseño de mezcla.

Agua en exceso o en defecto:

Para calcular el exceso o defecto de agua en los agregados se emplea las siguiente formula, usando el signo menos cuando la humedad es mayor que la absorción, es decir, existe un exceso, de lo contrario, existe un defecto.

$$A = M(H \pm Abs.) \qquad (12)$$

Donde:

M : Peso de la muestra seca para un metro cúbico de concreto

H : Humedad del agregado grueso o fino

Abs. : Absorción del agregado grueso o fino

Por ende, para el agregado grueso y fino, y teniendo en cuenta los valores de la Tabla 18. Resumen de caracterización de la grava., Tabla 19. Resumen de caracterización de la arena., y Tabla 30. Resumen previo de cantidades del diseño de mezcla. los pesos húmedos de los agregados, la se tienen lo siguiente,

$$A_g = 995{,}193kg * (0{,}0038 + 0{,}0248) = 28{,}503\ kg$$

$$A_f = 633.187\text{kg} * (0{,}0279 - 0{,}0124) = 9{,}766\ kg$$

Por tanto, la cantidad de agua necesaria en la mezcla es:

$$A = 200\ kg + 28{,}503\ kg - 9{,}766\ kg = 218.737\ kg$$

Cantidades para un metro cúbico de concreto:

Para sintetizar la información de la mezcla de concreto se presenta la siguiente tabla, teniendo en cuenta que los valores corresponden al diseño de mezcla para un metro cubico de concreto, con las especificaciones establecidas.

En la tabla se consignan los datos preliminares y el ajuste realizado a las cantidades por la humedad de los agregados.

Tabla 31. *Diseño de mezcla para un metro cubico de concreto.*

Material	Peso [kg/m3]	Densidad apare. [g/cm3]	Volumen [m3/m3]	Corrección [kg/m3]
Agua	200.000	1	0.2	218.677
Aire	0.000	-	0.02	0.000
Cemento	441.640	3.100	0.142	441.640
Agregado grueso	995.193	2.544	0.391	999.011
Agregado fino	633.877	2.572	0.246	651.532
Total	2270.711	-	1.00	2310.860

Fuente: Elaboración propia

Cantidades para un cilindro de concreto:

Para un cilindro con las dimensiones planteadas (15 x 30 cm), la cantidad de material necesaria se muestra en la *Tabla 32*, en cuyo caso, se requiere de $0.01m^3$ de concreto para la elaboración de un único cilindro.

Tabla 32. *Diseño de mezcla para un cilindro de concreto.*

Material	Peso [kg/m3]	Densidad apare. [g/cm3]	Volumen [m3/m3]	Corrección [kg/m3]
Agua	1.060	1	0.0011	1.159
Aire	0.000	-	0.0001	0.000
Cemento	2.341	3.100	0.0008	2.341
Agregado grueso	5.276	2.544	0.0021	5.296
Agregado fino	3.360	2.572	0.0013	3.454
Total	12.038	-	0.01	12.251

Fuente: Elaboración propia

Determinación de proporciones mezcla con escoria

Por otro lado, se realiza el procedimiento del numeral anterior (8.2.3.) con los datos obtenidos de la escoria. Cabe resaltar que los datos de la *Tabla 26* son los mismos para el diseño de mezcla de la escoria de alto horno, toda vez que las condiciones iniciales son iguales en los dos diseños.

Para este caso, los datos obtenidos de la estimación de agregados para la mezcla de concreto con escoria de alto horno se observan en la *Tabla 33*

Tabla 33. *Datos para estimación de agregados mezcla con escoria.*

Información	Datos
Módulo de finura	2.6
Volumen de gravilla por unidad de volumen de concreto (b/bo)	0,64
Volumen de partículas de agregado grueso por metro cubico de agregado grueso (bo')	0.593
Volumen de agregado grueso por metro cubico de concreto B	0,378 m^3/m^3
Volumen de agregado fino por metro cubico de concreto	0,260 m^3/m^3

Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, las cantidades iniciales para la mezcla de concreto con escoria que se obtuvieron a partir del diseño se muestran en la Tabla 34. Resumen previo de cantidades del diseño de mezcla con escoria.

Tabla 34. *Resumen previo de cantidades del diseño de mezcla con escoria.*

Material	Volumen [m3/m3]	Densidad apare. [g/cm3]	Peso [kg/m3]
Agua	0.200	1	200.000
Aire	0.020	-	0
Cemento	0.142	3.100	441.640
Agregado grueso	0.378	2.544	961.197
Agregado fino	0.260	2.245	583.271
Total	1.00	-	2186.108

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se realiza el ajuste de las cantidades por el contenido de humedad de los agregados, de forma similar al caso del diseño con agregados convencionales, en este cálculo, se considera la información de la *Tabla 24* y *Tabla 18*

Tabla 35. *Datos por ajuste de humedad diseño con escoria.*

Información	Datos	
Peso húmedo de la muestra de la grava Mhg	964,884	kg
Peso húmedo de la muestra de la arena Mhj	583.271	kg
Agua en exceso o defecto de la grava Ag	27,529	kg
Agua en exceso o defecto de la arena Aj	2,545	kg
Cantidad de agua de mezclado	230,074	kg

Fuente: Elaboración propia

De este modo, se pueden estimar las cantidades para el diseño con la escoria de alto horno para un metro cubico de concreto y para un cilindro de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura.

Tabla 36. *Diseño de mezcla para un metro cubico de concreto con escoria.*

Material	Peso [kg/m3]	Densidad apare. [g/cm3]	Volumen [m3/m3]	Corrección [kg/m3]
Agua	200.000	1	0.2	230.074
Aire	0.000	-	0.02	0.000
Cemento	441.640	3.100	0.142	441.640
Agregado grueso	961.197	2.544	0.378	964.884
Agregado fino	583.271	2.245	0.260	583.271
Total	2186.108	-	1.00	2219.870

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37. *Diseño de mezcla para un cilindro de concreto con escoria.*

Material	Peso [kg/m3]	Densidad apare. [g/cm3]	Volumen [m3/m3]	Corrección [kg/m3]
Agua	1.060	1	0.0011	1.220
Aire	0.000	-	0.0001	0.000
Cemento	2.341	3.100	0.0008	2.341
Agregado grueso	5.096	2.544	0.0020	5.115
Agregado fino	3.092	2.245	0.0014	3.092
Total	11.590	-	0.01	11.769

Fuente: Elaboración propia

Cantidades de material para cada diseño con reemplazo

Cabe resaltar, que para las muestras de los reemplazos de 5%, 10%,15% y 20%, la cantidad de material utilizado, se relacionan en la *Tabla 38*, *Tabla 39*, *Tabla 40* y *Tabla 41* , respectivamente. Dichos valores se obtienen a partir de las tablas del diseño de mezcla con arena y con escoria, en función de los porcentajes de participación establecidos en la propuesta.

Tabla 38. *Cantidades con el reemplazo de 5 % de escoria.*

Material	Mezcla normal	Mezcla escoria	Total
Agua (Lt)	6.608	0.366	6.974
Aire	0.000	0.000	0.000
Cemento [kg]	13.346	0.702	14.048
Agregado grueso [kg]	30.188	1.535	31.723
Agregado fino [kg]	19.688	0.928	20.616
Total [kg]	69.830	3.531	73.361

Fuente: Elaboración propia

Tabla 39. *Cantidades con el reemplazo de 10 % de escoria.*

Material	Mezcla normal	Mezcla escoria	Total
Agua (Lt)	6.260	0.610	6.870
Aire	0.000	0.000	0.000
Cemento [kg]	12.643	1.405	14.048
Agregado grueso [kg]	28.599	3.069	31.669
Agregado fino [kg]	18.652	1.855	20.507
Total [kg]	66.155	6.939	73.094

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40. *Cantidades con el reemplazo de 15 % de escoria.*

Material	Mezcla normal	Mezcla escoria	Total
Agua (Lt)	5.912	1.098	7.010
Aire	0.000	0.000	0.000
Cemento [kg]	11.941	2.107	14.048
Agregado grueso [kg]	27.011	4.604	31.614
Agregado fino [kg]	17.616	2.783	20.399
Total [kg]	62.479	10.592	73.071

Fuente: Elaboración propia

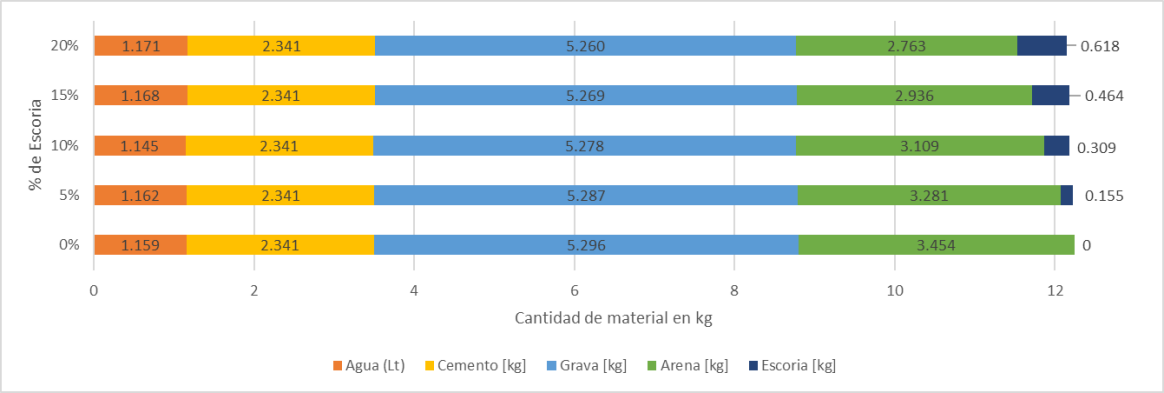
Tabla 41. *Cantidades con el reemplazo de 20 % de escoria.*

Material	Mezcla normal	Mezcla escoria	Total
Agua (Lt)	5.565	1.464	7.028
Aire	0.000	0.000	0.000
Cemento [kg]	11.238	2.810	14.048
Agregado grueso [kg]	25.422	6.138	31.560
Agregado fino [kg]	16.579	3.711	20.290
Total [kg]	58.804	14.122	72.926

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta un esquema en el cual se comparan las cantidades de los materiales para cada uno de los diseños realizados, en donde, se logra identificar en peso la cantidad de material necesario para la elaboración de los cilindros en función de las cantidades especificadas en las tablas.

Figura 27. *Comparación cantidades de materiales en los diseños*



Fuente: Elaboración propia

Mezcla de Concreto

Una vez definidas las cantidades para cada mezcla de concreto, se deben pesar los materiales para luego preparar la mezcla propiamente dicha y fundir los cilindros en cada proporción. Para realizar el proceso de mezclado se debe:

- Alistar la cantidad de material para cada espécimen según el diseño de mezcla, es decir, pesar y obtener la masa necesaria para cada material en cada mezcla de las tablas presentadas en el inciso anterior.
- Con el trompo, se mezcla el cemento con el agregado fino hasta obtener una mezcla homogénea, luego se adiciona el agregado grueso hasta obtener otra mezcla homogénea. Por último, se adiciona el agua hasta que la mezcla de concreto sea homogénea.
- Se procede a aplicar el desmoldante (aceite mineral) al interior de las camisas de concreto con las dimensiones requeridas, las cuales deben estar debidamente ajustadas.

- Se llenan los moldes en 3 capas iguales, considerando que por cada capa se apisona la mezcla con 25 golpes cada una, además del mazo se aplican de 10 a 15 golpes en los laterales del molde, para retirar el contenido de aire de la mezcla.
- Luego se enraza cada mezcla.

Figura 28. *Fundición de cilindros.*

Fuente: Elaboración propia

- Pasadas 24 horas se desmoldan los cilindros, para posteriormente curar los cilindros propiamente dichos sumergiéndolos en agua con cal. Cabe resaltar que el nivel de agua debe estar 7 cm por encima de los mismos, así mismo, se añade cal de acuerdo con la cantidad de agua que se tiene.

Figura 29. *Tanque de curado y curado de los cilindros*

Fuente: Elaboración propia

- Finalmente, se retiran los especímenes hasta el día que se requiera hacer el ensayo a la compresión, una vez finalizado el ciclo de 28 días para alcanzar la resistencia de diseño.

Ensayo a la Compresión.

El ensayo a la compresión se realiza en el laboratorio de estructuras de la Universidad Distrital, una vez los cilindros cumplen el ciclo de 28 días de curado y posterior a retirarlos del tanque en el cual fueron almacenados. Para este ensayo se procede a realizar lo siguiente:

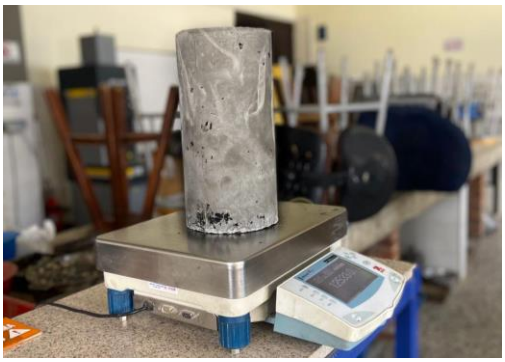
- Se retiran lo cilindros del tanque de curado, teniendo en cuenta el día que se desarrollará el ensayo de la resistencia a la compresión, para este caso, a los 28 días una vez se alcance la resistencia de diseño.

Figura 30. *Cilindros para ensayo de resistencia a la compresión*

Fuente: Elaboración propia

- Se determinan los diámetros de cada cilindro con ayuda de un flexómetro. Posteriormente con una escuadra metálica y galga se procede a medir la perpendicularidad de las caras, está no debe tener una desviación mayor a 5° grados, de acuerdo con la normatividad.
- Luego se pesa cada uno de los cilindros, en cuyo caso se empeló una balanza con una sensibilidad de 0.01 gr.

Figura 31. *Pesaje de cilindros.*



Fuente: Elaboración propia

- Después se procede a fallarlos en la respectiva máquina de compresión. Cabe resaltar que, se inicia con una precarga, esto se realiza para evitar dispersiones en los datos obtenidos, luego se procede a realizar la compresión hasta que el cilindro presente una fisura.

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos tras el procedimiento descrito antes.

Tabla 42. *Diámetros, masas, precarga y carga para cada cilindro*

Muestra	Espécimen	Diámetro (cm)			Masa (Kg)	Precarga (KN)	Carga (KN)
		1	2	3			
Sin escoria	1	15,1	15,0	15,2	12895,2	1,4	390,2
	2	15,1	14,9	15,1	12826,6	0,9	346,2
	3	15,0	14,8	15,1	12884,6	0,9	388,1
	4	14,5	15,5	15,1	12901,3	0,9	396
	5	15,4	15,0	14,8	12980,4	0,9	355,2
5%	1	14,8	14,6	14,7	12587,4	1,4	316
	2	15,2	15,3	15,0	12648,4	0,9	370
	3	14,9	15,1	15,1	12533,1	0,9	359,4
	4	15,1	14,8	15,0	12577,9	0,9	423,7
	5	15,2	15,0	15,1	12596,0	0,9	389,5
10%	1	14,8	15,4	15,6	12700,0	1,4	425,9
	2	15,1	15,3	15,3	12742,1	0,9	429,7
	3	15,3	15,4	15,4	12686,3	0,8	452,9
	4	14,8	14,9	14,7	12700,6	1	403,6
	5	15,5	15,2	15,4	12717,7	1,3	388,9
15%	1	14,9	15,1	15,0	12717,0	0,8	345,9
	2	15,1	15,2	15,4	12435,0	0,9	374,7

Muestra	Espécimen	Diámetro (cm)			Masa (Kg)	Precarga (KN)	Carga (KN)
		1	2	3			
	3	15,2	15,0	15,1	12631,0	0,9	457,7
	4	14,7	14,8	15,0	12349,0	0,9	351,2
	5	15,5	15,2	15,3	12373,0	1	373,2
20%	1	15,1	15,0	15,2	12349,0	0,9	376,9
	2	15,2	15,5	15,1	12420,0	0,9	382,1
	3	14,9	15,3	15,2	12296,0	0,9	378,4
	4	15,3	15,4	15,0	12437,0	0,9	419,5
	5	15,2	15,3	15,5	12478,0	0,9	392,9

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la superficie de falla de los cilindros se muestra en las siguientes imágenes, que, para la mayoría de los casos, se presenta una fisura vertical o una fisura en un plano inclinado, cercano a los 45°.

Figura 32. *Superficies de falla cilindros convencionales*

Fuente: Elaboración propia

Figura 33. *Superficies de falla cilindros con 5% de escoria*

Fuente: Elaboración propia

Figura 34. *Superficies de falla cilindros con 20% de escoria*

Fuente: Elaboración propia

Análisis de Resultados

Densidad y resistencia del concreto

Con los resultados de la siguiente tabla, se evidencia la resistencia promedio obtenida por cada muestra de los especímenes de cilindros a los 28 días. Los datos se calculan partiendo de la información de la *Tabla 42*, con la cual se estima el área de los cilindros en las caras circulares, la densidad (masa por unidad de volumen) y el esfuerzo o resistencia a la compresión alcanzada, que responde a la relación entre la fuerza aplicada y el área de la cara sobre la cual se aplica la fuerza.

Tabla 43. *Área, densidad y resistencia para cada cilindro y grupo*

Muestra	Espécimen	Diámetro promedio [cm]	Área [cm^2]	Densidad [kg/cm^3]	Densidad promedio [kg/cm^3]	Resistencia [MPa]	Resistencia promedio alcanzada [MPa]
Sin escoria	1	15.10	179.07	2.40	2.42	21.71	21.06
	2	15.03	177.50	2.40		19.45	
	3	14.96	175.93	2.44		22.00	
	4	15.03	177.50	2.42		22.25	
	5	15.06	178.28	2.42		19.87	
5%	1	14.70	169.71	2.47	2.38	18.53	20.98
	2	15.16	180.66	2.33		20.43	
	3	15.03	177.50	2.35		20.19	
	4	14.96	175.93	2.38		24.03	
	5	15.10	179.07	2.34		21.70	
10%	1	15.26	183.05	2.31	2.33	23.19	23.08
	2	15.23	182.25	2.33		23.52	
	3	15.36	185.45	2.28		24.37	
	4	14.80	172.03	2.46		23.40	
	5	15.36	185.45	2.28		20.89	
15%	1	15.00	176.71	2.39	2.33	19.52	21.19
	2	15.23	182.25	2.27		20.51	
	3	15.10	179.07	2.35		25.50	
	4	14.83	172.80	2.38		20.27	
	5	15.33	184.65	2.23		20.15	
20%	1	15.10	179.07	2.29	2.27	20.99	21.40
	2	15.26	183.05	2.26		20.82	
	3	15.13	179.87	2.27		20.98	
	4	15.23	182.25	2.27		22.96	
	5	15.33	184.65	2.25		21.22	

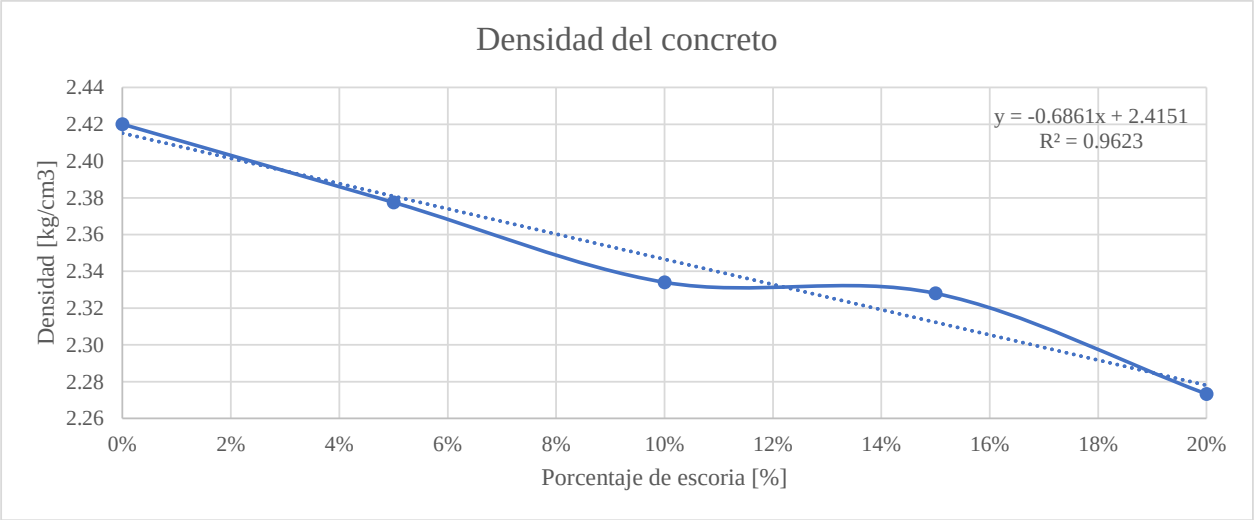
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la tabla anterior, se evidencia que la densidad de los cilindros disminuye conforme aumenta el porcentaje de participación de la escoria dentro de la mezcla, así mismo, teniendo en cuenta que la densidad es directamente proporcional a la masa, este parámetro de los cilindros también disminuye.

Lo anterior, se contrasta con las cantidades de los materiales mostrados en las tablas en las cuales se presentan las cantidades del diseño, en donde, conforme aumenta el porcentaje de participación de la escoria, su peso aumenta y, por tanto, el peso de la arena disminuye para conformar la mezcla. Ahora bien, el peso de la grava también disminuye al aumentar la cantidad de escoria.

La siguiente gráfica muestra la correlación entre el porcentaje de escoria y la densidad de los cilindros, en donde se evidencia una relación inversamente proporcional y aproximadamente lineal entre las variables que se comparan.

Figura 35. *Gráfico de Densidad del concreto vs Porcentaje de escoria*



Fuente: Elaboración propia

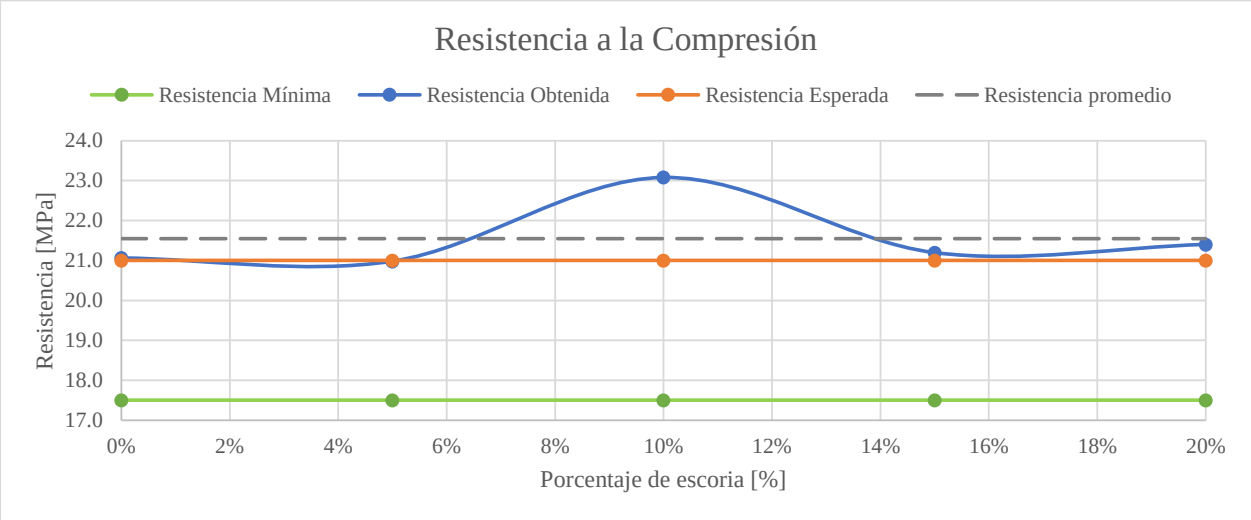
De lo anterior, es importante tener en cuenta que, de conformidad con la NSR-10, se considera un concreto liviano cuando la densidad se encuentra entre 1440 y 1840 kg/m3, para el

cual debe aplicarse un factor λ en las consideraciones de diseño, además, el concreto debe cumplir con unos requisitos especiales para ser usado como concreto estructural. En este sentido, de acuerdo con la gráfica anterior y en función de la línea de tendencia, se estima, que más de un 83% de participación de la escoria generaría un concreto liviano, en cuyo caso sería necesario realizar estudios adicionales para emplear el concreto en la construcción.

Ahora bien, comparando la resistencia a la compresión de los cilindros y el porcentaje de participación de escoria, se evidencia que en ningún caso la resistencia de los especímenes se ve disminuida por la adición del residuo del proceso productivo del acero, lo que implica un aspecto positivo para su implementación como agregado fino.

Por otra parte, en el caso de los cilindros con reemplazo del 10%, se nota una diferencia positiva en cuanto a la resistencia, es decir, el valor esperado del diseño (21MPa) aumenta, sin embargo, este valor no es significativo frente a la resistencia con la cual se diseñaron los cilindros, obteniendo 2MPa adicionales, lo que representa un 10% de aumento aproximadamente.

Figura 36. *Gráfico de Resistencia a la compresión vs Porcentaje de escoria*



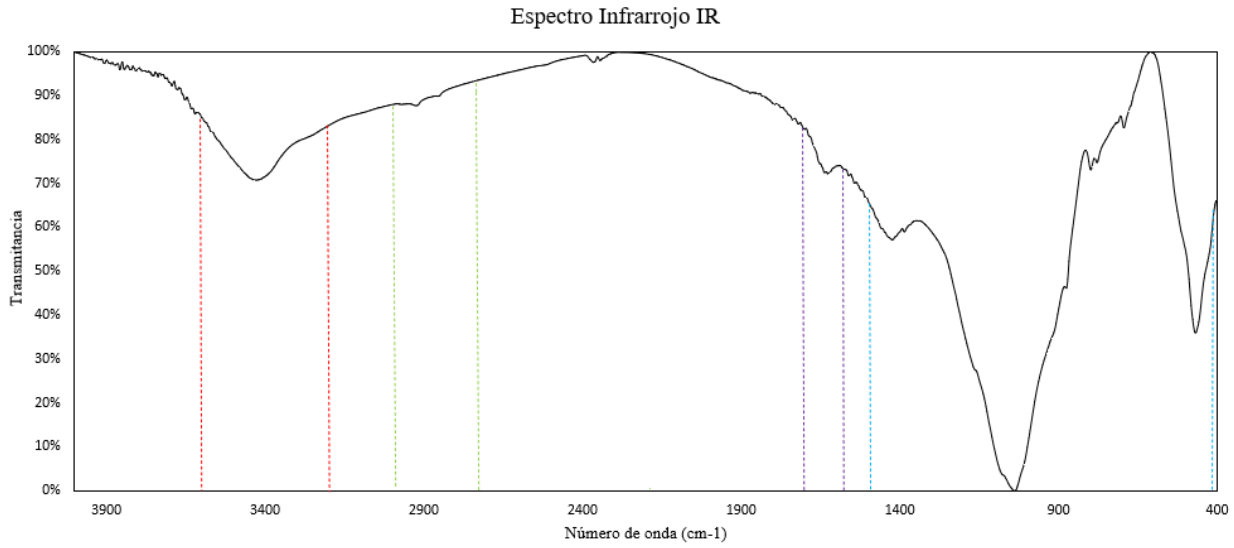
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se evidencia que las fisuras a 45° es una falla tipo IV; según la norma NTC 637 indica “Fractura diagonal sin fisuras a través de los extremos”, por otro lado, las fallas verticales se clasifican como: “Fisuras verticales encolumnadas a través de ambos extremos, conos mal formados”

Análisis Químicos de la Escoria

De acuerdo con las características principales de un espectro de infrarrojo y las zonas típicas con las cuales se identifican los grupos funcionales, se presenta el siguiente gráfico, con el cual se realiza en análisis de la información contenida en el ensayo

Figura 37. *Gráfico ensayo Infrarrojo (IR): Escoria de alto horno.*



Fuente: Elaboración propia

- En la franja roja se observa un pico centrado a 3424 cm-1, lo cual indica que hay presencia de grupos hidroxilo O-H ya sea estructurales o superficiales, provenientes de agua adsorbida probablemente asociada a estructuras tipo silicatos.

- En la franja verde, las bandas a 2918 cm-1 y 2848 cm-1, corresponden a estiramientos simétricos y asimétricos del grupo C-H, asociado a materia orgánica presente considerando la procedencia de la muestra.
- En la franja de color morado, se observa una banda débil a 1626 cm-1, que se asocia a los estiramientos C=C de la materia orgánica presente.

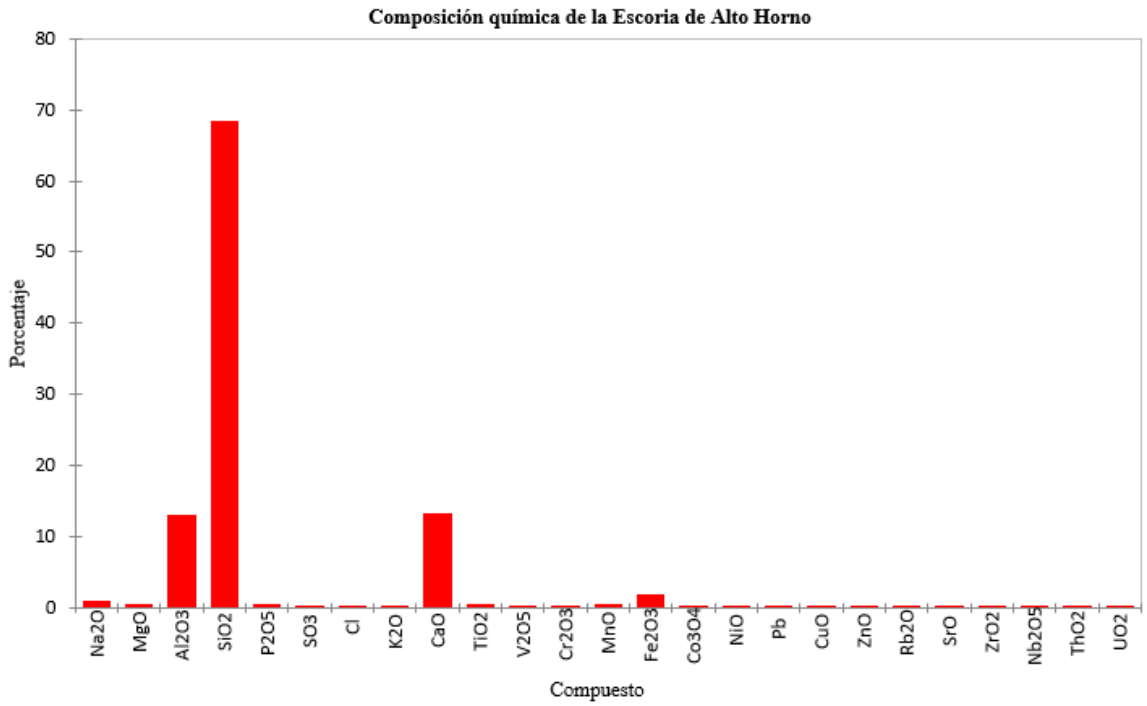
- La banda débil centrada a alrededor de 1470 cm-1 corresponde al tijereteo del grupo C-H.
- La banda fuerte centrada en 1037 cm-1 se asocia con el estiramiento Si-O-Si en estructuras de silicato, cuya presencia se demuestra por la banda media y estrecha alrededor de 467 cm-1 que se asocia con vibraciones de los enlaces Si-O.

Ahora bien, con respecto al ensayo de fluorescencia de rayos X (XRF) permite evidenciar la composición química de la escoria de alto horno. En concordancia con el análisis de espectroscopía infrarroja, se encuentra en mayor proporción el óxido de silicio (SiO2), que compone alrededor del 70% de la muestra, seguido de óxido de aluminio (Al2O3) con aproximadamente 13% y óxido de calcio (CaO) con aproximadamente 13%; el resto de óxidos se encuentran por debajo de 3%

En la gráfica se evidencia el porcentaje de participación de cada uno de los compuestos que se identificaron en el ensayo, lo que típicamente concuerda con los elementos encontrados en otros estudios y que son mostrados en la *Figura 10*

La presencia del óxido de calcio y dióxido de silicio es un común denominador de la escoria de alto horno, sin embargo, en el caso de estudio, no se presenta una alta proporción de hematita (Fe_2O_3), que es generalmente encontrada en otros estudios y posee un alto porcentaje de participación en el material.

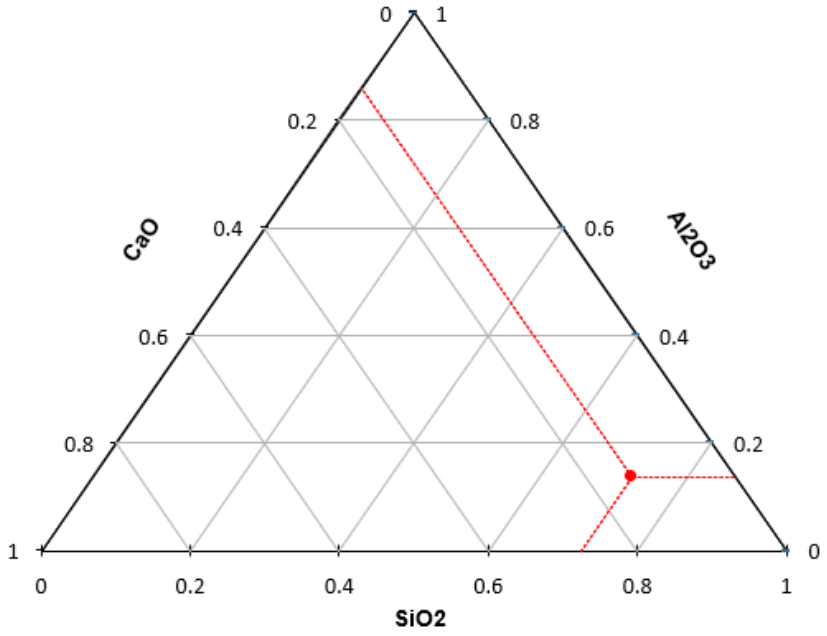
Figura 38. *Composición química de la escoria.*



Fuente: Elaboración propia

Una manera de observar la composición relativa de la escoria de alto horno es través del diagrama ternario, donde el óxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de calcio (CaO) representarían el 72.354%, 13.685% y 13.962% de la muestra analizada.

Figura 39. *Diagrama ternario: Composición química relativa de la escoria.*



Fuente: Elaboración propia

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

La escoria de alto horno empleada como agregado fino en la mezcla de concreto no modifica en gran medida en la resistencia a la compresión del concreto, puesto que los valores obtenidos luego de los ensayos son aproximadamente iguales a la resistencia de diseño esperada en las muestras de concreto, es decir 21 MPa. Sin embargo, se obtiene un aumento del 10% en la resistencia cuando la escoria representa el 10% del agregado fino en la mezcla de concreto, lo que indica que es una combinación optima de materiales para la elaboración de concretos con reemplazo de material fino por material de residuo de la industria del acero.

Por otra parte, es importante resaltar que, la densidad del concreto disminuye a una tasa de 0.69% por cada porcentaje de aumento en la cantidad de escoria de alto horno que participe dentro de la mezcla de concreto, lo que hace al concreto menos pesado cuando la cantidad de escoria en porcentaje de la mezcla aumenta, es decir, cuando no existe escoria en el concreto, su densidad es de 2.4 Kg/m^3 y cuando se tiene el 20% de escoria, la densidad es de 2.27 kg/m^3. Dicha característica permitiría aligerar las estructuras de concreto.

Por otro lado, se puede evidenciar que la falla tipo II obtenida para algunos de los especímenes indican una falla por cizallamiento común en materiales de baja capacidad para deformarse plásticamente como el concreto. Con respecto a las fisuras tipo III, se puede deber a efectos de expansión causados por vacíos o burbujas causados por la integración de la escoria.

A través del ensayo químico XRF se puede evidenciar en mayor cantidad los componentes Óxido de Silicio (SiO_2), Óxido de Aluminio (Al_2O_3), Óxido de Calcio (CaO) y Óxido de hierro III (Fe_2O_3), los cuales aportan capacidad puzolánica y afectan la reactividad y la formación de productos de hidratación en el concreto. La composición química de la escoria de alto horno analizada es en términos generales igual a la composición química de las escorias

producidas en otros países, en donde, cambian los porcentajes de participación de los compuestos, más, sin embargo, se presentan los mismos compuestos.

Recomendaciones

De acuerdo con la literatura y los análisis químicos realizados a la escoria de alto horno, se recomienda para futuras investigaciones evaluar la reacción álcali agregado del concreto con reemplazo de material fino por escoria de alto horno, toda vez que la escoria presenta grandes contenidos de sílice y dicho elemento es aquel que fomenta la aparición o generación de la expansión y agrietamiento de los elementos del concreto, lo que produciría una mejor vida útil de las estructuras. Por tanto, aunque la resistencia a la compresión no se afecta en forma negativa, la durabilidad del concreto podría reducirse con la aparición de la reacción álcali–agregado.

Por otra parte, se recomienda evaluar la viabilidad de reemplazar el cemento por escoria de alto horno, dado que, en algunos estudios se presenta un aumento en la resistencia a la compresión y teniendo en cuenta que la composición de la escoria varía en función de la materia prima empleada para su fabricación y los procesos de la producción de acero. Así, el comportamiento del concreto puede variar según el material empleado.

Por otro lado, se recomienda evaluar la posibilidad de que, reemplazando en mayor cantidad la escoria por el agregado fino, el concreto clasifique como concreto liviano de acuerdo a los límites establecidos según la Norma Sismo- Resistente NSR 10 debido a la disminución de la densidad del mismo, esto sería útil para disminuir el peso a estructuras donde se requiera menor carga muerta.

La elaboración de estudios adicionales permitirá garantizar la conveniencia de usar la escoria de alto horno y de esta manera, presentar cierta confiabilidad en el uso de materiales de residuo dentro de las mezclas de concreto, de tal forma que disminuya el consumo de recursos naturales y la explotación de canteras.

Limitaciones

Este trabajo de grado presenta algunas limitaciones las cuales pudieron influir en la interpretación de los resultados, se presentan las siguientes:

El refrentado de los cilindros presenta una limitación, debido a que influyen en los resultados del ensayo de compresión axial; dado que es usado para tener una superficie plana en las caras del cilindro para aplicar la carga uniformemente y distribuir los esfuerzos. Según (Rueda, 2018) indica que "Una superficie con un desnivel de 0.25 mm puede causar una reducción del 66% de la resistencia máxima."

Por otro lado, el origen y proceso de fabricación de la escoria utilizada como sustituto del agregado fino puede variar en sus características físicas y químicas lo cual podría haber influido en los resultados obtenidos.

También se encuentran factores externos en la fabricación y prueba de cilindros de concreto donde se produjeron fluctuaciones en los equipos de laboratorio y cambios en las condiciones climáticas, afectando los resultados.

Referencias

360 en concreto. (2 de Junio de 2020). *Caracterización de impactos ambientales en la industria de la construcción*. Recuperado el 5 de Agosto de 2023, de 360 en concreto: https://360enconcreto.com/blog/detalle/impactos-ambientales-en-la-industria-de-la-construccion/

Alicante, U. d. (1 de Junio de 2023). *Servicios Técnicos de Investigación*. Obtenido de https://sstti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x-de-monocristal-y-espectroscopias-vibracional-y-optica/espectroscopia-infrarroja.html

Asocreto. (2010). *Tecnología del Concreto - Tomo 1. Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas* (Tercera ed.). Bogotá, Colombia: Nomos Impresores.

Beltrán Castillo, E., & Ortiz Ariza, V. H. (Septiembre de 2010). Estudio del comportamiento de la mezcla de agregados adicionados con el 3,5, 4,5 y 5,5% de limalla fina, para las mezclas de concreto. *Tesis de grado*. Bucaramanga, Colombia.

BREEAM. (2021). *Los sectores más contaminantes del planeta y sus soluciones*. Obtenido de breeam.es: https://breeam.es/sectores-mas-contaminantes-del-planeta/

Camarena Flores, A., & Díaz Garamendi, D. (26 de Enero de 2022). Análisis comparativo de la resistencia a la compresión, flexión y trabajabilidad del concreto tradicional versus un concreto utilizando escoria de hacer como agregado fino. Lima, Perú. doi:https://doi.org/10.51372/gacetatecnica231.3

Carballo Ricardo, J. A. (2015). *Propuesta de utilización de escorias siderurgicas en hormigones de 20.0 MPa.* Trabajo de Diploma, Universidad de Holguín, Departamento de Ingeniería Civil, Holguin.

Cárdenas Pulido, J., Lizarazo-Marriaga, J., & Aperador Chaparro, W. (2016). Comportamiento mecánico de sistemas cementantes ternarios (Cemento portland - ceniza volante - Escoria de alto horno). *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales (RLMM)*, 16.

Cementos Tequendama. (31 de Diciembre de 2017). *¿Qué es el cemento y cuál es su composición?* Obtenido de cetesa.com.co: https://cetesa.com.co/blog/que-es-el-cemento-y-cual-es-su-composicion/#:~:text=El%20cemento%20hidr%C3%A1ulico%20es%20la,temperaturas%20y%20mezclados%20con%20yeso.

Cristancho., Y. A. (2015). *Importancia de los ensayos TGA y DSC en el estudio de las propiedades térmicas de mezclas asfálticas*. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Cruz Hernández, R. A., Franco Durán, D. M., & Pérez Bustos, L. (2014). *Reemplazo del Agregado Fino por Escoria de Horno de Cubilote para la Fabricación del Concreto.* Artículo de Investigación Científica, Bucaramanga. Obtenido de INGE CUC, vol. 10, no. 1, pp. 83–88, 2014

DANE. (11 de Diciembre de 2023). Estadísticas de Concreto Premezclado (EC). Colombia. Recuperado el 15 de Enero de 2024, de https://acortar.link/1NTFwa

Espinoza, L., & Escalante, I. (11 de Junio de 2008). Comparación de las propiedades del concreto utilizando escoria de alto horno como reemplazo parcial o total del cemento Pórtland ordinario. Nicaragua. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/26602250_Comparacion_de_las_propiedades_del_concreto_utilizando_escoria_de_alto_horno_como_reemplazo_parcial_y_total_del_cemento_Portland_ordinario/fulltext/00b4f1e60cf22e18225a14fd/Comparacion-de-las-propiedades-d

Gonzales Chumpitazi, P. R., & Sotomayor Sanchez, R. D. (2015). Plan de negocios para la estructuración y puesta en marcha de una empresa de calidad de concreto pre-mezclado. *Proyecto de Investigación gerencial aplicado*. Lima, Perú.

González Ortega, M. A. (Julio de 2015). Comportamiento y diseño de hormigones estructurales con áridos siderúrgicos EAF. *Tesis doctoral*. Barcelona, España.

Granada, C. (Agosto de 2023). IMPACTO AMBIENTAL EN LA CONSTRUCCIÓN. *IMPACTO AMBIENTAL EN LA CONSTRUCCIÓN*. Leaf Sostenibilidad para todos.

ICONTEC. (21 de Noviembre de 2018). NTC 174. *Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto*. Bogotá, Colombia.

ICONTEC. (12 de Septiembre de 2018). NTC 77. *Concreto. Método de ensayo para el análisis po tamizado de los agregados finos y gruesos.* Bogotá, Bogotá, Colombia.

ICONTEC. (16 de Octubre de 2019). NTC 176. *Método de ensayo para determinnar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso*. Bogotá, Colombia.

ICONTEC. (27 de Agosto de 2019). NTC 221. *Cementos. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico*. Bogotá, Colombia.

ICONTEC. (20 de Marzo de 2019). NTC 92. *Método de ensayo para la determinación de la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en agregados*. Bogotá, Colombia.

ICONTEC. (19 de Junio de 2019). NTC 98. *Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste por abrasión e impacto de agregados gruesos menor de 37,5 mm, utilizando la máquina de los ángeles*. Bogotá, Bogotá, Colombia.

ICONTEC. (19 de Junio de 2019). NTC 98. *Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste por abrasión e impacto de agregados gruesos menor de 37,5 mm, utilizando la máquina de los ángeles.* Bogotá, Colombia.

ICONTEC. (15 de Julio de 2020). NTC 237. *Método para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino*. Bogotá, Colombia.

ICONTEC. (18 de Marzo de 2020). NTC550. *Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto en el sitio de trabajo*. Bogotá, Bogotá, Colombia.

ICONTEC. (18 de Junio de 2021). NTC 121. *Especificaciones de desempeño para cemento hidráulico*. Bogotá, Colombia.

ICONTEC. (17 de Noviembre de 2021). NTC 673. *Concretos. Metódo de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*. Bogotá, Colombia.

ICONTEC. (14 de Diciembre de 2022). NTC - 454. *Concreto fresco. Toma de muestras*. Bogotá, Colombia.

INVIAS. (2012). INV E – 240 – 13. *Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos.* Bogotá, Bogotá, Colombia.

Jamshidi, A., Kurumisawa, K., Nawa, T., Jize, M., & White, G. (2017). Performance of pavements incorporating industrial byproducts: A state-of-the-art study. *Journal of Cleaner Production*, 367-388.

Lizarazo, J., Salas, A., & Escobar, D. (2016). Efectos del Curado en las Propiedades de Mezclas de Concreto con Altos Contenidos de Escoria de Hierro. *Información Tecnológica – Vol. 27 Nº 6 2016*, 12.

Madrid, C., Garcia, E., & Borges, C. (2016). Resistencia a la compresión de concretos con escoria de alto horno. Estado del arte re-visitado. *Revista ALCONPAT*, 20. doi:http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i1.116

Mc Cormac, J., & Russell, B. (2017). *Diseño de Concreto reforzado* (Décima ed.). Cuidad de México, México: Alfaomega Grupo Editor.

Montjoy, V. (11 de Febrero de 2023). *¿Qué es el hormigón de escoria de acero?* Recuperado el 5 de Agosto de 2023, de ArchDaily Colombia: https://www.archdaily.co/co/995993/que-es-el-hormigon-de-escoria-de-acero

Panalytical, M. (2023). *Análisis de rayos X*. Recuperado el 15 de Agosto de 2023, de https://www.malvernpanalytical.com: https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/xray-analysis

Patiño Sánchez, D. F. (Marzo de 2017). Evaluación de la resistencia bajo carga monotónica de una mezcla asfáltica, fabricada con escoria de acero. Bogotá, Bogotá, Colombia. Obtenido de https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/1905/browse?type=author&value=Pati%C3%B1o+Sanchez%2C+Daniel+Francisco

Puertas, F. (1993). Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico. *ICCET/CSIC*, 12. Obtenido de https://digital.csic.es/bitstream/10261/55875/1/740.pdf

Rodgers, L. (17 de Diciembre de 2018). *La enorme fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizás no conocías*. Recuperado el 5 de Agosto de 2023, de BBC News: https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783

Rueda, D. F. (2018). INFLUENCIA DEL TIPO DE REFRENTADO EN ENSAYOS DE COMPRESIÓN AXIAL DE CILINDROS DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA. Bogotá, Colombia : Universidad Nacional.

Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero* (Quinta ed.). Bogotá, Colombia: Bhandar Editores Ltda.

Sosa Yépez, I. (Abril de 2017). *Incorporación de escorias siderúrgicas en hormigones autocompactantes de altas prestaciones.* Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, LADICIM, Santander.

Suárez Hincapié, L. C. (2018). *Evaluacion de escorias siderúrgicas de horno de arco eléctrico en mezclas de concreto estructural.* Trabajo de grago, Universidad de los Andes, Bogotá. Obtenido de https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/35e66b72-3ba9-4549-b98b-e73e196a9263/content

Tomalá Palma, O. J., & Pozo Reyes, J. Y. (2022). Diseño de hormigones con cemento portland de resistencias f'c = 210, 240 y 280 kg/cm2 con agregado grueso de escoria de acero de alto horno. La libertad, Ecuador. Obtenido de https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/8432/1/UPSE-TIC-2022-0021.pdf

Vidal. (s.f.). *Nanobusiness*. Obtenido de https://nanobusiness.com.br/es/servicos/ensaios-analises-tecnicas/area-superficial-especifica-bet/

Villaquirán Caicedo, M., Eduard, M., & Camilo, R. (2023). La escoria siderúrgica de alto horno como alternativa ecológica en la producción de materiales de construcción: revisión. (U. d. Valle, Ed.) Cali, Colombia. Recuperado el 25 de Agosto de 2023, de https://hdl.handle.net/10893/25725

Anexos

1. Diseño de mezcla de concreto convencional y con reemplazo
2. Resultados ensayo de espectroscopia de infrarrojo
3. Resultados ensayo de fluorescencia de rayos X