

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA CIVIL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL**

**TEMA:
APLICACIÓN DE LA ESCORIA DE FUNDICIÓN DE HIERRO COMO
AGREGADO EN LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN PARA PAVIMENTOS
RÍGIDOS**

**AUTOR:
DIEGO ANDRÉS NASIMBA CHANATAXI**

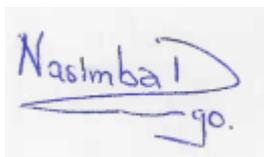
**TUTOR:
NELSON EDY ÁLVAREZ SÁNCHEZ**

Quito, noviembre del 2017

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo Diego Andrés Nasimba Chanataxi, con documento de identificación N° 172069428-8, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: **APLICACIÓN DE LA ESCORIA DE FUNDICIÓN DE HIERRO COMO AGREGADO EN LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

A handwritten signature in blue ink on a light-colored background. The signature reads "Nasimba Chanataxi" with a stylized flourish at the end.

.....
Diego Andrés Nasimba Chanataxi
Cédula: 172069428-8
Fecha: noviembre 2017

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Nelson Edy Álvarez Sánchez declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo académico: APLICACIÓN DE LA ESCORIA DE FUNDICIÓN DE HIERRO COMO AGREGADO EN LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS, realizado por Diego Andrés Nasimba Chanataxi con CI: 172069428-8, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, noviembre 2017



.....
Ing. Nelson Edy Álvarez Sánchez
Cédula: 170366120-5

APLICACIÓN DE LA ESCORIA DE FUNDICIÓN DE HIERRO COMO AGREGADO EN LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS

APPLICATION OF THE SCREEN OF CAST IRON AS ADDED IN THE CONCRETE MIXES FOR RIGID PAVEMENTS

Diego Nasimba - Chanataxi¹

Resumen

En este artículo de investigación se compara la resistencia a la compresión y flexión de un hormigón convencional utilizado para la construcción de vías (pavimento rígido), con un hormigón que contiene escoria de fundición de hierro en reemplazo parcial del agregado grueso (ripio) en porcentajes de 5%, 10%, 15%. Con este objetivo se elaboraron mezclas de hormigón y sus respectivos especímenes cilíndricos y vigas estándar, para realizar los ensayos de compresión y flexión. Concluyéndose que el hormigón con el 15% de escoria obtuvo los mejores resultados, con el 39,02 MPa en el ensayo de compresión y 5,35 MPa en el ensayo a flexión, sin dejar de lado que con los porcentajes de 5% y 10 % de escoria también se obtuvieron buenos resultados con respecto al hormigón sin escoria, además se debe dar a conocer que las características físicas del hormigón con escoria disminuyeron (revenimiento). Obteniéndose así un hormigón de mejores características mecánicas que un hormigón normal utilizado para pavimento rígido y que contiene en su composición un material que puede ser reciclado (escoria de fundición de hierro), la misma que es producida en grandes cantidades anualmente en el Ecuador por la industria metalúrgica.

Palabras Clave: agregado, escoria de hierro, hormigón, pavimento rígido.

Abstract

In this research article compares the resistance to compression and bending of a conventional concrete used for the construction of roads (rigid pavement), with a concrete that contains slag of iron smelting in partial replacement of the aggregate thickness (gravel) in percentages of 5%, 10%, 15%. With this objective, concrete mixtures and their respective cylindrical specimens and standard beams were elaborated to perform the corresponding compression and bending tests. It was concluded that the concrete with 15% slag obtained the best results, with 39,02 MPa in the compression test and 5,35 MPa in the flexure test, without neglecting that with the percentages of 5% and 10% of slag also obtained good results with respect to concrete without slag, it should also be known that the physical characteristics of slag concrete decreased (slump). Obtaining thus a concrete of better mechanical characteristics than a normal concrete used for rigid pavement and containing in its composition a material that can be recycled (iron foundry slag), the same that is produced in large quantities annually in Ecuador by the metallurgical industry.

Keywords: Aggregate, iron slag, concrete, rigid pavements.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito - Ecuador.
Autor para correspondencia: dnasimba@est.ups.edu.ec

1. Introducción

En el Ecuador se ha tomado conciencia que la red vial es lo más importante para su desarrollo, dejando así atrás la idea de construir vías con materiales de baja calidad y de poca durabilidad, si bien es cierto que la construcción de las vías con pavimentos flexibles (asfalto) resulta más económica que la construcción en pavimentos rígidos, esta tiene su desventaja, que es el constante mantenimiento para cumplir con su vida útil, de 10 y 15 años, lo que conlleva a grandes costos, como lo indica Farinango. [1]

La construcción de vías con pavimentos rígidos tiene un costo elevado, pero sus mantenimientos son mínimos permitiendo, llegar a su vida útil de 20 y 30 años con bajos costo de mantenimiento. Quedando demostrado que las vías de hormigón son la solución a los elevados mantenimientos y poca durabilidad de las vías en pavimento flexible, así sean más costosas en su construcción, ya que las vías se desarrollan en función de conseguir su durabilidad a lo largo de su vida útil, brindando confort y seguridad a los usuarios, como lo indica Higuera. [2]

Las vías de pavimento rígido deben soportar cargas vehiculares de diferente tipo y su resistencia a compresión y flexión debe ser elevada, es por esto que en el mundo se han realizado varias investigaciones en cuanto a la durabilidad, trabajabilidad y resistencia del hormigón utilizado para la construcción de vías en pavimentos rígidos, añadiéndole a su mezcla diferentes tipos de adiciones minerales, naturales y artificiales como son cenizas volantes, humo de sílice, escoria de alto hornos, residuos de la incineración de desechos, fibras de material reciclado, entre otros, que no son parte original de la mezcla de hormigón, esperando mejorar el hormigón para que cumpla con requisitos de calidad y durabilidad

en el tiempo y en el tipo de estructura a emplearse.

Uno de los principales factores de degradación del hormigón en las vías del Ecuador es el clima y la calidad de los materiales empleados en la elaboración del hormigón, lo que ha llevado a realizar investigaciones para evitar una degradación prematura del hormigón.

Según Reyes y Soto [3], instituciones como el IMCYC “Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto”, ha realizado pruebas en laboratorio de mezclas de hormigón para pavimentos rígidos, con la adición de materiales no propios de la mezcla, ceniza volcánica, escorias, llegando a obtener resultados de resistencias a los 90 días de 102 MPa, mediante la adición de estos elementos.

Algunas escorias granuladas de alto horno de hierro trituradas, utilizadas ya sea en el cemento mezclado o como agregado en mezclas de hormigón aumenta considerablemente la expectativa de vida del hormigón expuesto a ataques por sulfatos, además muchas escorias reducen considerablemente la permeabilidad del hormigón, permitiendo una resistencia efectiva de las mezclas de hormigón elaboradas con cementos tipo I y II, así lo explica el “ACI comité 201. *Guide to durable concrete (ACI 201.2R-01)*, American Concrete Institute”.

Por lo tanto, el objetivo principal de esta investigación es evaluar las características físicas y mecánicas de las mezclas de hormigón diseñadas con reemplazo parcial del agregado grueso (ripio) por escoria de fundición de hierro en porcentajes de 5%, 10% y 15%, específicamente su resistencia a compresión y flexión.

2. Materiales y Métodos

2.1. Características de los materiales utilizados

- Agregados

Para obtener un de hormigón de buena calidad es necesario utilizar agregados (arena y ripio) de buenas características físicas y mecánicas, “el material proveniente de la zona de Pifo es considerado uno de los mejores en nuestro país” [4], por sus propiedades físicas y mecánicas, por esta razón se obtuvo los agregados de la cantera perteneciente a la empresa RIPCONCIV CONSTRUCTORA Cía. Ltda., ubicada en la parroquia de Pifo, carretera 28C vía a Papallacta, Km 4.

- Escoria

Es un producto no metálico, constituido generalmente por silicatos y aluminosilicatos de calcio y otras bases, la misma se desarrolla en un estado de fundición simultánea con el hierro en altos hornos según NTE INEN 1762, para la utilización de la escoria como agregado en las mezclas de hormigón, se tomó como referencia los requisitos establecidos por la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 782 (ASTM C-33, ASTM C-989).

La escoria utilizada para esta investigación fue proporcionada por la empresa FUNTEIN Cía. Ltda., ubicada en San Antonio de Pichincha, la misma que se dedica a la fundición de chatarra de hierro para la elaboración de diferentes piezas. La escoria fue triturada a un tamaño nominal de 25,4 mm, de la cual se obtuvieron varias muestras para la realización de los ensayos previos a la elaboración de las mezclas de hormigón.

Para poder reemplazar parcialmente al agregado grueso, en porcentajes de 5%, 10% y 15%, se realizó un tamizado a la escoria obteniendo una granulometría similar a la del agregado grueso.

Además, se realizó una mezcla granulométrica del agregado grueso y la escoria obteniendo una nueva curva de granulometría para los diferentes porcentajes de sustitución.

Considerando que la calidad del hormigón depende mucho de las características físicas y mecánicas de cada uno de sus componentes y de la cantidad que intervienen en la mezcla, los agregados (arena, ripio, escoria), fueron sometidos a ensayos minuciosos de laboratorio, los que permitieron evidenciar su calidad, propiedades físicas y mecánicas. Estos ensayos se realizaron respetando tanto las normas nacionales NTE INEN e internacionales ASTM, los mismos que se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Resumen de normas

Ensayo	Norma
Porcentaje de abrasión	NTE INEN 860 (ASTM C- 131)
Granulometría de agregados	NTE INEN 969 (ASTM C- 136)
Peso unitario suelto y compactado	NTE INEN 858 (ASTM C- 29)
Capacidad de absorción	Agregado grueso (ripio y escoria): NTE INEN 857 (ASTM C- 127)
	Agregado fino NTE INEN 856 (ASTM C-128)
Peso específico aparente	Agregado grueso (ripio y escoria): NTE INEN 857 (ASTM C- 127)
	Agregado fino: NTE INEN 856 (ASTM C-128)
Contenido de humedad natural	NTE INEN 862 (ASTM C- 566)

- Cemento

El cemento utilizado en esta investigación es de marca Holcim de uso general (GU) o conocido como portland tipo I, el mismo está diseñado para todo tipo de construcción en general, contando como principales características su resistencia, durabilidad y destacado desempeño que cumple y excede los estándares de la norma ecuatoriana NTE INEN 2380, la densidad del cemento es de 2,94 g/cm³, según lo establece Orbea. [5]

- **Agua**

El agua es fundamental para la elaboración del hormigón, ya que participa en la reacción con el cemento y además proporciona al hormigón la trabajabilidad necesaria para una correcta puesta en obra, para esta investigación se utilizó agua potable de la ciudad de Quito a una temperatura de 18 y 23°C.

2.2. Diseño y elaboración de la mezcla

El diseño de la mezcla de hormigón se realizó a partir del procedimiento descrito en el Método del A.C.I. (Instituto Americano del Concreto), el cual consiste en el uso de tablas donde se establecen las cantidades de los elementos que conforman la mezcla de hormigón, en función de las características de los agregados.

En esta investigación se realizó un diseño para una resistencia $f_c = 28$ MPa y su elaboración se realizó en base a la norma NTE INEN 3124 (ASTM C-192).

Se elaboro probetas cilíndricas con diámetro de 150 mm y altura de 300 mm, vigas estándar de 150 mm de ancho, 500 mm de largo y altura de 150 mm, como lo establece la norma NTE INEN 1576 (ASTM C-31) para ser ensayadas a edades de 7, 14, 21 y 28 días, todos los especímenes se elaboraron con diferentes porcentajes de sustitución del agregado grueso (ripio) por escoria de fundición de hierro (0%, 5%, 10%, 15%).

2.3. Ensayos realizados a los especímenes de hormigón para determinar las propiedades físicas y mecánicas.

El hormigón por estar constituido con materiales diferentes en su mezcla, sus propiedades están sujetas a muchas variables las cuales son: la calidad de los áridos, la cantidad de agua utilizada, así como el tipo de cemento y las reacciones que entrega al reemplazar parcialmente

el agregado grueso por escoria. Es por esto que para determinar las propiedades físicas y mecánicas del hormigón con escoria se realizaron pruebas estandarizadas. En estado fresco mediante el ensayo de cono de Abrams (revenimiento) y en estado endurecido mediante los ensayos de resistencia a compresión y resistencia a flexión, de acuerdo con las normas nacionales e internacionales vigentes las mismas que son: NTE INEN 1578 (ASTM C-143), NTE INEN 1573 (ASTM C-39), NTE INEN 2554 (ASTM C-78), respectivamente.

3. Análisis de resultados y discusión

En este punto se presentan, los resultados obtenidos de la investigación las cuales se detallarán en dos etapas, las cuales se ha definido como etapa de prueba y etapa definitiva.

3.1. Etapa de prueba

En esta etapa se realizó los ensayos a los agregados incluyendo a la escoria de fundición de hierro, la dosificación de la mezcla para un hormigón de 28 MPa de resistencia a los 28 días y la rotura de 62 especímenes cilíndricos de hormigón con y sin escoria de fundición de hierro como se indica en la tabla 2, los resultados de los ensayos realizados a los agregados y la combinación granulométrica entre el agregado grueso y la escoria de fundición de hierro se muestran en la tabla 3, en la figura 1 se muestra la curva granulométrica del agregado grueso (ripio y escoria), en la figura 2 y 3 se muestra la curva granulométrica de la arena y la combinación granulométrica de las mezclas de hormigón con escoria.

Tabla 2. Especímenes de prueba elaborados y ensayados

MÉTODO ACI MEZCLAS DE PRUEBA F' C = 28 MPa				
HORMIGÓN	PROBETAS POR EDAD			
	7 DIAS	14 DIAS	21 DIAS	28 DIAS
H.S.E	3	3	1	6
5% DE ESCORIA	3	3	1	6
10 % DE ESCORIA	3	3	1	6
15% DE ESCORIA	3	3	1	6

Tabla 3. Caracterización de los agregados

ENSAYOS REALIZADOS EN LABORATORIO							
AGREGADOS		RIPIO		ESCORIA		ARENA	
Pesos Unitarios	Suelto	1,43 g/cm ³		1,31 g/cm ³		1,58 g/cm ³	
	Compactado	1,49 g/cm ³		1,40 g/cm ³		1,73 g/cm ³	
Peso específico aparente		2,64 g/cm ³		2,51 g/cm ³		2,54 g/cm ³	
Capacidad de absorción		2.35%		1,83%		4,46%	
Porcentaje de humedad		0,46% (Variable)		0 % (Variable)		0,41% (Variable)	
Porcentaje de abrasión		22%		30,20%			
Análisis Granulométrico		Tamaño (mm)	% que pasa	Tamaño (mm)	% que pasa	Tamaño (mm)	% que pasa
		38,10	100	38,10	100	9,53	100
		25,40	100	25,40	96	4,75	100
		19,05	96	19,05	79	2,36	74
		12,70	50	12,70	38	1,18	50
		9,53	32	9,53	19	0,59	34
		4,75	6	4,75	2	0,30	23
				2,36	1	0,15	16
				0,08	10		
						Módulo de finura 3,03	
Combinación granulométrica Agregado grueso (ripio) y escoria de fundición de hierro		5 % Escoria de fundición de hierro		10 % Escoria de fundición de hierro		15 % Escoria de fundición de hierro	
		Tamaño (mm)	% que pasa	Tamaño (mm)	% que pasa	Tamaño (mm)	% que pasa
		25,40	100	25,40	100	25,40	99
		19,05	96	19,05	95	19,05	94
		12,70	49	12,70	49	12,70	48
		9,53	32	9,53	31	9,53	30
4,75	6	4,75	6	4,75	6		

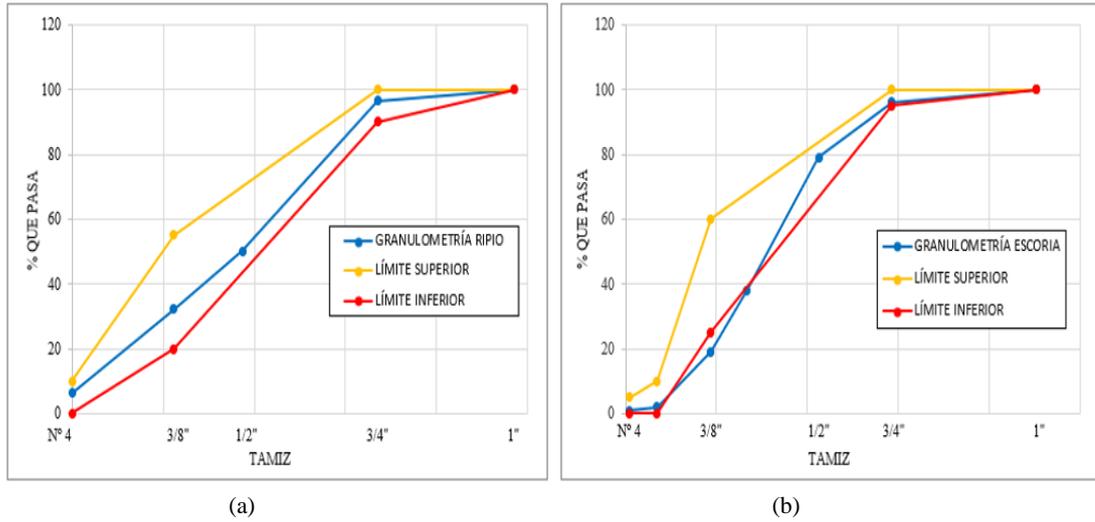


Figura 1. Ensayo granulométrico: (a) Granulometría ripio (b) Granulometría escoria

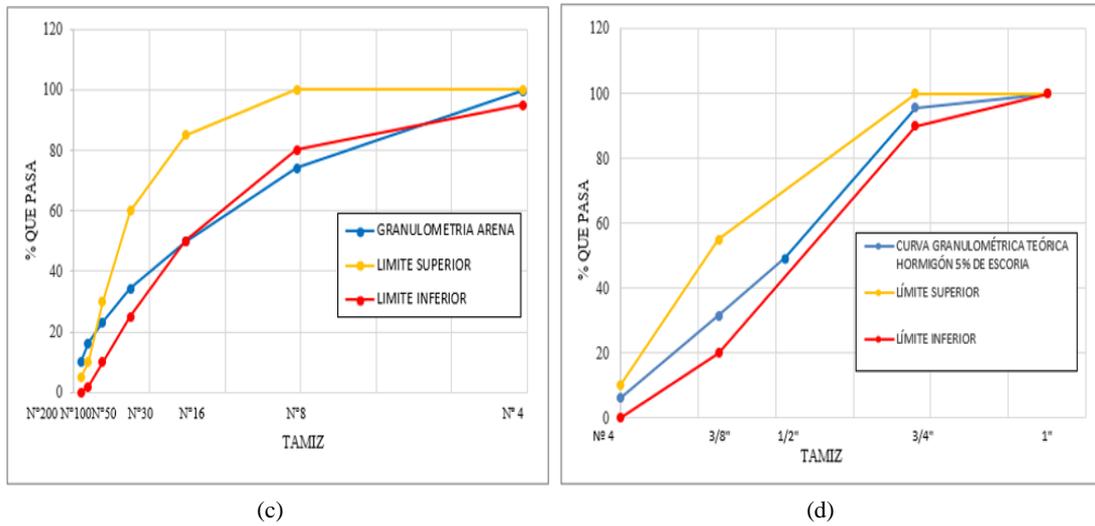


Figura 2. Ensayo y combinación granulométrica: (c) Granulometría arena, (d) Granulometría hormigón 5% de escoria.

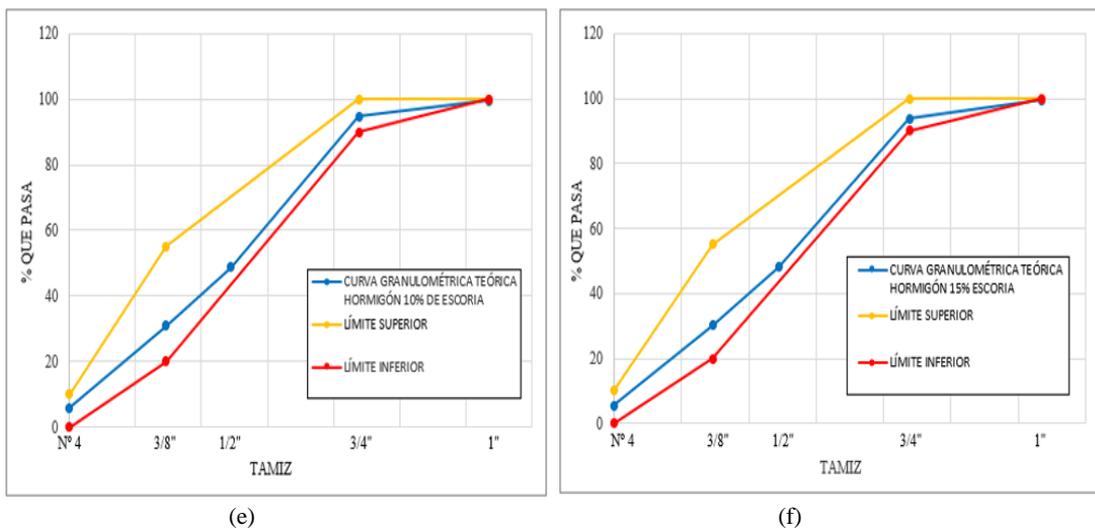


Figura 3. Combinación granulométrica: (e) Granulometría hormigón 10% de escoria, (f) Granulometría hormigón 15% de escoria.

La dosificación para un hormigón de 28 MPa de resistencia nominal a los 28 días, realizado por el método ACI, considerando un asentamiento de 75 mm-100 mm y un tamaño nominal máximo de agregado grueso de 19,05

mm se presenta en la tabla 4, la misma que puede variar de acuerdo con el contenido de humedad natural de los agregados, ensayo que se lo debe realizar previo a la realización de las mezclas de hormigón en laboratorio.

Tabla 4. Dosificación para hormigón $f_c=28$ MPa

Hormigón convencional $f_c= 28$ MPa			
Materiales	Cantidades en (Kg) para 1 m3 de hormigón	Dosificación al peso	Cantidad en (Kg) por saco de cemento de 50 Kg
Agua	251,39	0,57	28,57
Cemento	439,91	1,00	50
Agregado grueso	898,11	2,04	102,08
Agregado fino	731,29	1,66	83,12
Hormigón 5 % de escoria $f_c= 28$ MPa			
Agua	251,37	0,57	28,57
Cemento	439,91	1,00	50,00
Agregado Grueso Ripio	853,21	1,94	96,98
Agregado Grueso Escoria	44,70	0,10	5,08
Agregado fino	731,29	1,66	83,12
Hormigón 10 % de escoria $f_c= 28$ MPa			
Agua	251,34	0,57	28,57
Cemento	439,91	1,00	50,00
Agregado Grueso Ripio	808,30	1,84	91,87
Agregado Grueso Escoria	89,40	0,20	10,16
Agregado fino	731,29	1,66	83,12
Hormigón 15 % de escoria $f_c= 28$ MPa			
Agua	251,31	0,57	28,56
Cemento	439,91	1,00	50,00
Agregado Grueso Ripio	763,40	1,74	86,77
Agregado Grueso Escoria	134,10	0,30	15,24
Agregado fino	731,29	1,66	83,12

La selección de los porcentajes de reemplazo del agregado grueso (ripio) por escoria de fundición de hierro que son de 5% , 10% y 15%, fueron seleccionados considerando la cantidad de hormigón utilizada para la construcción de vías en pavimento rígido, la misma que depende de su longitud y espesor de la capa de rodadura, además se consideró el stock

de escoria de fundición de hierro que se produce en el Ecuador, las misma que no podrían abastecer la construcción de una vía si se consideran porcentajes superiores o si la vía es de gran extensión. Tomando en cuenta estas consideraciones en la tabla 5 se muestran los resultados alcanzados de las muestras de prueba ensayadas.

Tabla 5. Ensayos realizados a los especímenes de prueba hormigón $f_c=28$ MPa

Porcentaje de sustitución del agregado grueso por escoria de hierro	Número de probetas ensayadas a 7,14 (3/edad) y 28 días (6/edad)	Resistencia a la compresión a los 28 días de edad $f_c=28$ MPa	Valor obtenido en %
-	12	29,80	106,43
5	12	33,58	119,93
10	12	34,93	124,75
15	12	38,83	138,66

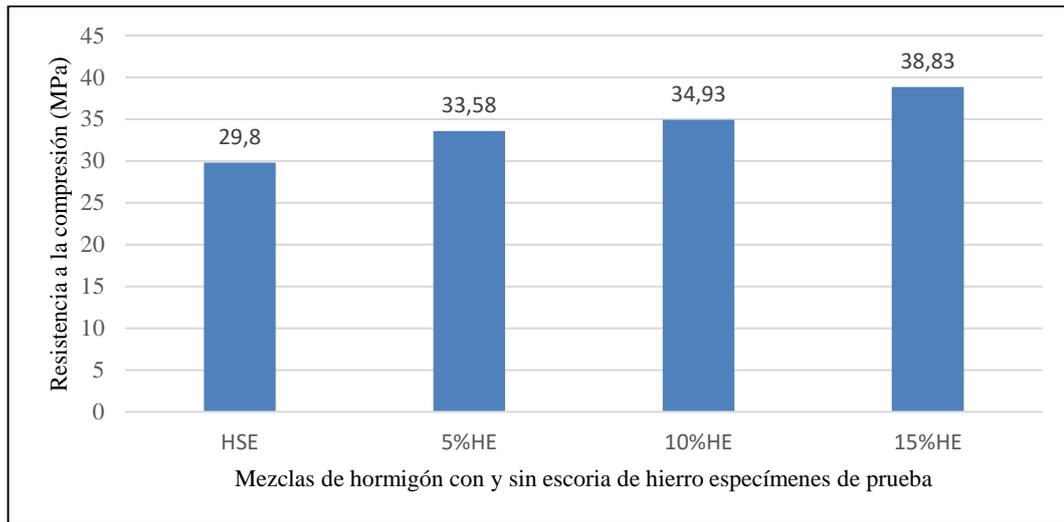


Figura 4. Resistencia especímenes de prueba a los 28 días de edad

De los datos presentados en la tabla 5, se obtuvo que la resistencia de la mezcla convencional es de 29,80 MPa y la resistencia máxima con la sustitución del agregado grueso por escoria de hierro fue de 38,83 MPa, con el 15 % de escoria.

Adicionalmente, se debe destacar que la escoria de fundición de hierro, no reacciona de forma perjudicial al ser incorporada en las mezclas de hormigón, si no que permitió una mejor adherencia entre la pasta de cemento y sus agregados esto debido a que la escoria contiene una textura rugosa y angulosa, lo que permite que la pasta se distribuya y se produzca una mejor adherencia. En cuanto a la reacción química que contendrá la escoria de fundición de hierro al mezclarse con el cemento portland tipo I, esta no será dañina, ya que el cemento contiene una

composición química similar a la de la escoria de hierro.

Según el “ACI comité 201. *Guide to durable concrete (ACI 201.2R-01)* American Concrete Institute” menciona, que la escoria de alto horno bien graduada y triturada mejora la trabajabilidad del hormigón y la tasa de desarrollo de la resistencia de los hormigones correctamente dosificados y elaborados con escoria, pueden igualar o superar a los hormigones de cemento portland a los 28 días. La figura 5 muestra la escoria de fundición de hierro triturada.



Figura 5. Muestra de escoria triturada

3.2. Etapa definitiva

Una vez definida y corregida la dosificación del hormigón para la realización de las mezclas definitivas y el tamizado de la escoria se procedió a la realización y ensayo de 92 especímenes (72 cilindros y 20 vigas), con la sustitución del agregado grueso (ripio) por escoria de fundición de hierro en los porcentajes que se indica en la tabla 6.

Tabla 6. Número de especímenes definitivos realizados $f_c=28$ MPa

Tipo de espécimen	Volumen de espécimen	Porcentaje de sustitución del agregado grueso por escoria de hierro	Número de especímenes	Cantidad de escoria utilizada (Kg)
Cilindros	0,0055 m ³	-	18	0,00
		5	18	4,83
		10	18	9,66
		15	18	14,48
Vigas	0,0120 m ³	-	5	0,00
		5	5	2,68
		10	5	5,36
		15	5	8,05

Los especímenes cilíndricos se ensayaron a edades de 7, 14, 21 y 28 días y las vigas a los 28 días de edad, esto se realizó para analizar la propiedades físicas y mecánicas del hormigón tanto en estado fresco como en estado endurecido, lo que nos permitirá conocer el comportamiento del hormigón al sustituir parcialmente el agregado grueso (ripio) por escoria de fundición de hierro en los porcentajes de 5%, 10% y 15%.

A todos los especímenes elaborados, se les realizó el curado respectivo en sumersión en piscinas a temperaturas de $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, como lo indica la norma NTE INEN 2528.

3.2.1. Ensayos de revenimiento realizado al hormigón en estado fresco

Las propiedades de las mezclas de hormigón en estado fresco fueron evaluadas para todos los porcentajes de sustitución del agregado grueso por escoria de fundición de hierro mediante el ensayo de revenimiento con el cono de Abrams, los mismos se realizaron según lo establecido en la norma NTE INEN 1578 (ASTM C-143), los resultados se presentan en la tabla 7 y 8.

Tabla 7. Propiedades del hormigón fresco en especímenes cilíndricos

Porcentaje de sustitución del agregado grueso por escoria de hierro	Número de especímenes	Revenimiento (mm)	Trabajabilidad	Homogeneidad
-	18	82	Media	Buena
5	18	76	Media	Buena
10	18	74	Media	Buena
15	18	70	Media	Buena

Tabla 8. Propiedades del hormigón fresco en vigas

Porcentaje de sustitución del agregado grueso por escoria de hierro	Número de especímenes	Revenimiento (mm)	Trabajabilidad	Homogeneidad
-	5	80	Media	Buena
5	5	74	Media	Buena
10	5	70	Media	Buena
15	5	60	Media	Media

Los resultados mostrados en la tabla 7 y 8 permiten evidenciar que la trabajabilidad del hormigón va disminuyendo con el incremento del porcentaje de sustitución de la escoria, esto se esperaba ya que la escoria de fundición de hierro contiene textura rugosa y angulosa y eso permite su mejor adherencia entre la pasta de cemento y los agregados dificultando su fluidez.

En la figura 6 se muestra el ensayo de revenimiento realizado a las mezclas de hormigón elaboradas.



Figura 6. Ensayo de revenimiento

3.2.2. Ensayos al hormigón en estado endurecido

- Resistencia a la compresión

El ensayo de resistencia a la compresión consiste en aplicar una carga axial de compresión a los especímenes moldeados de hormigón hidráulico a una velocidad establecida hasta que ocurra la falla del mismo, este ensayo se realizó a todos los especímenes cilíndricos según lo establece la norma NTE INEN 1573

(ASTM C- 39), cuyos resultados se presentan en la tabla 9, además se puede evidenciar la rotura de especímenes cilíndricos en la figura 7.

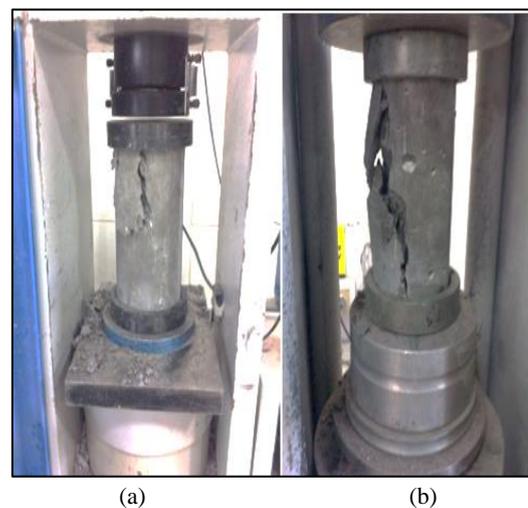


Figura 7. Ensayo a compresión de especímenes cilíndricos: (a) hormigón convencional (b) hormigón 15% escoria

En la figura 7, se evidencia la rotura de un espécimen cilíndrico de hormigón convencional (a) y (b) un espécimen con la sustitución del 15% del agregado grueso (ripio) por escoria de hierro en donde claramente se puede evidenciar que el espécimen con 15% de escoria tiene una rotura explosiva vertical columnar en uno de sus extremos, esto por soportar mayor carga y su mejor adherencia entre la pasta y los agregados, que en el espécimen de hormigón convencional que tiene una rotura parcial en el extremo superior izquierdo que es normal ya que se realiza el ensayo con neoprenos.

Tabla 9. Propiedades del hormigón endurecido en especímenes cilíndricos

EDAD (días)	Número de especímenes ensayados	Resistencia sin escoria		Resistencia 5% escoria		Resistencia 10% escoria		Resistencia 15% escoria	
		MPa.	%	MPa.	%	MPa.	%	MPa.	%
7	7	21,45	76,59	22,00	78,58	23,22	82,94	24,19	86,39
14	7	25,50	91,09	26,20	93,57	27,11	96,83	29,28	104,58
21	5	27,91	99,69	28,90	103,23	31,39	112,11	32,28	115,30
28	12	29,87	106,70	33,54	119,77	35,02	125,09	39,02	139,37
σ		0,89		0,64		1,20		1,14	
C.V (%)		2,98		1,91		3,43		2,92	

σ = Desviación estándar de especímenes cilíndricos de 28 días de edad
 C.V = Coeficiente de variación de resistencia de especímenes cilíndricos de 28 días de edad

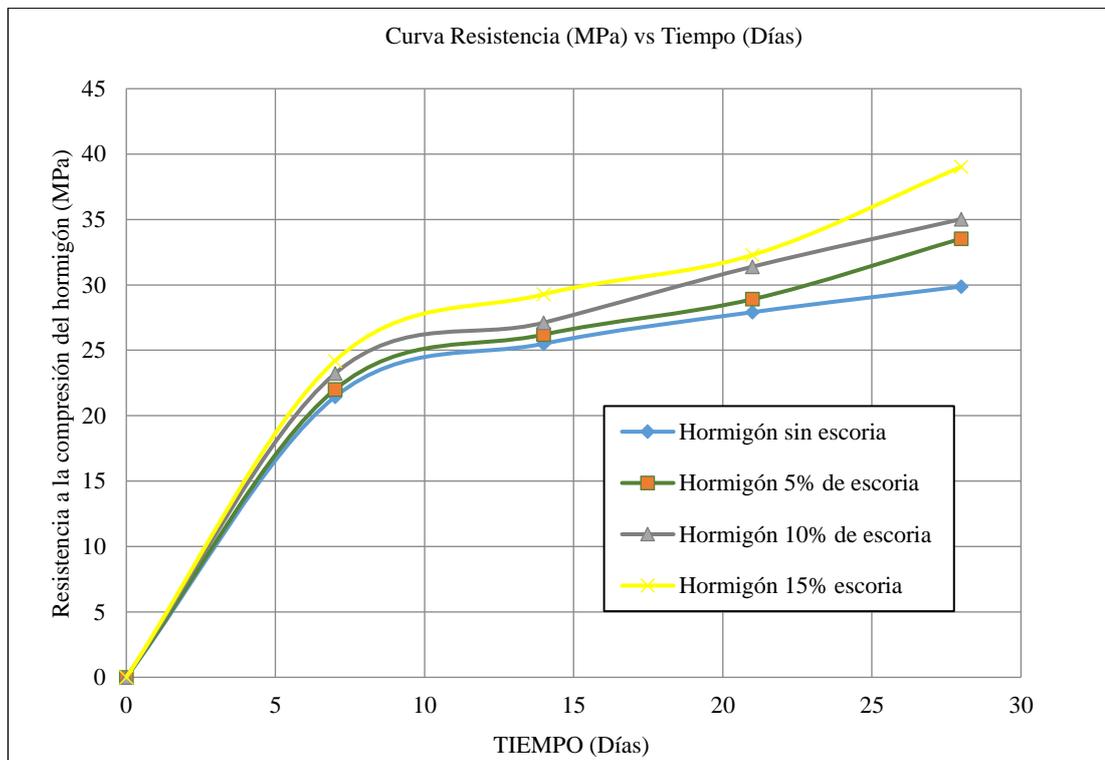


Figura 8. Curva de resistencia a la compresión del hormigón Vs edad (días)

Finalizados todos los ensayos a compresión de los especímenes cilíndricos de las mezclas de hormigón para una resistencia de 28 MPa, con diferentes sustituciones del agregado grueso (ripio) por escoria de fundición de hierro se obtiene la figura 8 donde se

puede observar el incremento de la resistencia a compresión a los 28 días de edad, pudiéndose constatar que mientras mayor sea la sustitución del agregado grueso (ripio) por la escoria mayor será la resistencia a la compresión.

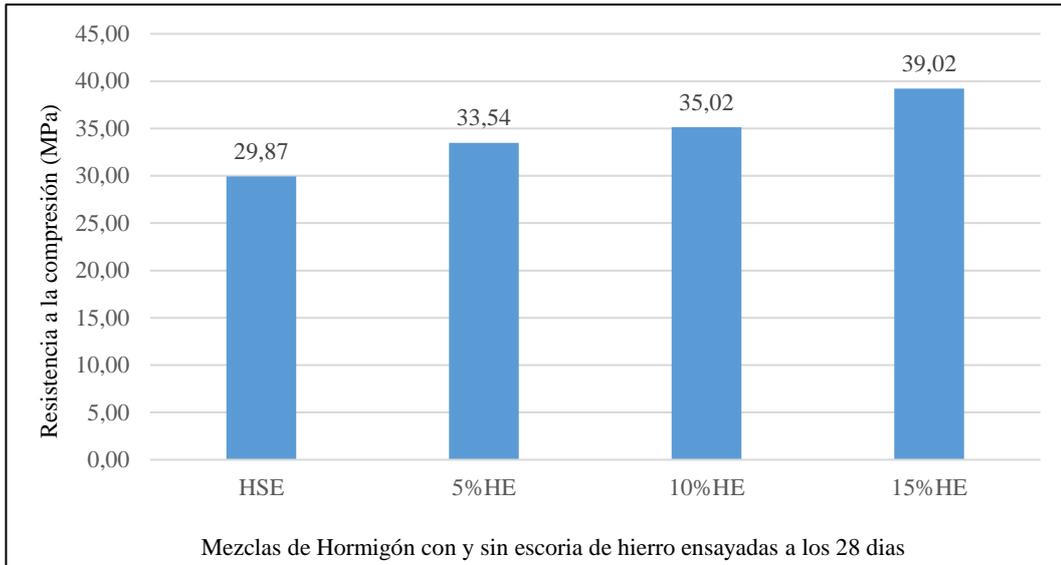


Figura 9. Comparación de la resistencia a los 28 días de edad del hormigón convencional con el hormigón con reemplazo parcial del agregado grueso (ripió) por escoria de fundición de hierro

Como se puede evidenciar al comparar los datos obtenidos en la figura 9, el incremento de la resistencia a la compresión de las mezclas de hormigón es notable en cuanto a la mezcla convencional que obtuvo un valor de 29,87 MPa, la mezcla de 5% de escoria tuvo un incremento de 12,28%, la de 10% de escoria incremento de 17,24% y la de 15% de escoria un 30,63% con respecto al a la muestra sin escoria.

- Resistencia a flexión

Los ensayos se realizaron de acuerdo a lo especificado en la norma NTE INEN 2554 (ASTM C-78), en el cual indica el procedimiento para la realización del ensayo, que consiste en someter hasta la rotura a una viga de hormigón con dimensiones de 500 mm de longitud, 150 mm de ancho, 150 mm de altura, la misma que debe ser sometida a una carga constante y sin impacto hasta llegar a la rotura, como se indica en la figura 10, en la tabla 10 se indican los

resultados obtenidos para los especímenes ensayados.



Figura 10. Ensayo a flexión de vigas: (a) Preparación de especímenes, (b) Especímen sin escoria, (c) Especímen con escoria de hierro

Como se observa en la figura 10 las vigas con y sin escoria de hierro presentan la misma falla, la ruptura total del espécimen en el tercio medio.

Tabla 10. Ensayo a flexión de vigas de hormigón

Identificación	Porcentaje de escoria de fundición de hierro	Número de especímenes ensayados	Edad (días)	Falla	Carga máxima (kN)	Módulo de rotura (MPa)
PVHSE	-	5	28	TERCIO MEDIO	38,68	5,16
PE1	5	5	28	TERCIO MEDIO	39,52	5,27
PEV1	10	5	28	TERCIO MEDIO	39,58	5,28
PEE1	15	5	28	TERCIO MEDIO	40,12	5,35

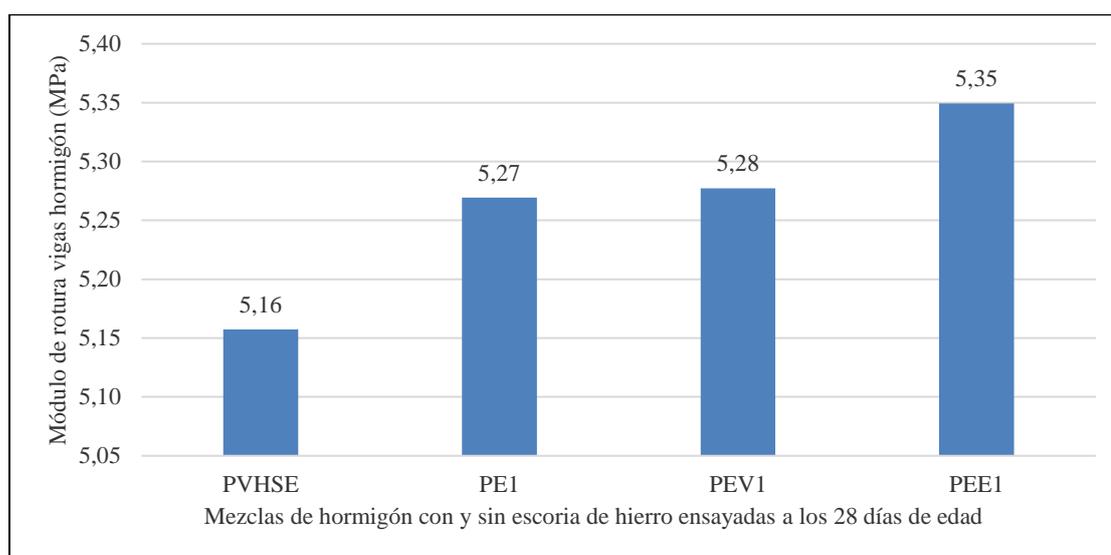


Figura 11. Comparación del Módulo de rotura del Ensayo a flexión de vigas de hormigón con y sin escoria de hierro

De los datos observados en la figura 11 claramente se ve un aumento significativo de resistencia a la flexión de los especímenes que contienen el 15% de escoria, obteniendo un valor de 5,35 MPa, lo que significa un 3,68% de incremento, mientras que en los que contienen 5% y 10% de escoria se evidencian una resistencia de 5,27 MPa y 5,28 MPa, lo que significa un 2,13% y 2,32% de incremento respectivamente en su resistencia con respecto a los especímenes ensayados sin escoria.

- *Resistencia característica del hormigón*

La aceptabilidad de un hormigón se la obtiene a los 28 días de edad ya que se ha alcanzado la resistencia requerida de

diseño, luego de esta edad la resistencia se incrementa en un pequeño valor. Los resultados de los ensayos a la compresión no dependen únicamente de los valores obtenidos en la máquina de ensayo, sino que también dependen de la regularidad de la producción del hormigón, y de las exigencias del tipo de obra.

El hormigón está sujeto a múltiples variables, resultando difícilmente encontrar una resistencia única para todos los hormigones, por lo tanto, para el diseño de mezclas debe adoptarse un valor estadístico que abarque la resistencia deseada.

En esta investigación se realizó un análisis estadístico a las muestras de hormigón mediante tres autores diferentes las mismas que utilizan como

principal factor de análisis la desviación estándar, a continuación, se indica las fórmulas utilizadas por los autores para el cálculo de la resistencia media del hormigón investigado.

- *Resistencia característica del hormigón según Montoya - Meseguer - Moran*

$$F_{ck} = F_{cm}(1 - 1,64\delta) \quad (1)$$

Dónde:

F_{cm} = Resistencia media calculada.

F_{ck} = Resistencia característica del hormigón.

δ = Coeficiente de variación de resistencia.

- *Resistencia característica del hormigón según Oscar Padilla*

$$F_{ck} = 2F_{cm1} - F_{cm2} \quad (2)$$

Dónde:

F_{cm1} = Resistencia media calculada del primer subgrupo (primera mitad del grupo de especímenes analizados).

F_{cm2} = Resistencia media calculada del segundo subgrupo (segunda mitad del grupo de especímenes analizados).

F_{ck} = Resistencia característica del hormigón.

- *Resistencia característica del hormigón según Saliger*

$$F_{ck} = 0,75 F_{cm} \quad (3)$$

Dónde:

F_{cm} = Resistencia media calculada del grupo analizado.

F_{ck} = Resistencia característica del hormigón.

Para el análisis se utilizó 12 especímenes cilíndricos (6 de prueba y 6 definitivas) de 28 días de edad, los resultados se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Análisis estadístico de especímenes cilíndricos

Resistencia característica del hormigón				
Autor	Hormigón sin escoria (MPa)	Hormigón 5% de escoria (MPa)	Hormigón 10% de escoria (MPa)	Hormigón 15% de escoria (MPa)
Resistencia Media	29,87	33,54	35,02	39,02
Montoya -Meseguer -Moran	28,42	32,49	33,05	37,15
Óscar Padilla	31,98	34,96	37,28	41,89
Saliger	22,41	25,15	26,27	29,27

Los resultados obtenidos en la tabla 11 muestran la resistencia característica del hormigón, según Oscar Padilla (2), y Saliger (3), quienes consideran el cálculo de la resistencia característica tomando un porcentaje de la media aritmética y sin considerar un coeficiente de variación de resistencia, por lo tanto, este valor no es representativo de la

mezcla de hormigón. Mientras que Montoya - Meseguer - Moran (1), considera la media aritmética y además un coeficiente de variación de resistencia que representa la dispersión de los resultados obtenidos, por lo tanto, el método aplicado para calcular la resistencia característica es confiable [6], obteniendo un valor de resistencia

característica del hormigón sin escoria de 28,42 MPa, mientras que las mezclas con el 5%, 10% y 15% obtuvieron un valor de 32,49 MPa, 33,05 MPa, 37,15 MPa respectivamente, lo que significa un incremento de 14,32%, 16,29% y 30,71% en las mezclas con sus respectivos porcentajes de escoria.

4. Conclusiones y Recomendaciones

La sustitución parcial del agregado grueso (ripió) por la escoria de fundición de hierro influye directamente en las características físicas como son: la trabajabilidad y la consistencia del hormigón en estado fresco, la misma se pudo evidenciar con la disminución del asentamiento en 12 mm en los especímenes cilíndricos y de 20 mm en las vigas de hormigón, esta disminución del asentamiento se debe a que la escoria de fundición de hierro contiene una textura rugosa y angulosa, permitiendo una mayor adherencia y trabazón entre los mismos. Este efecto es más visible mientras mayor es la cantidad de remplazo del agregado grueso (ripió) por escoria de fundición de hierro.

Se evidenció que los especímenes cilíndricos convencionales ensayados sin escoria en estado endurecido la rotura fue suave en sus extremos, mientras que en los especímenes elaborados con escoria la rotura fue explosiva y en algunos casos columnar, pudiendo concluir que a mayor cantidad de remplazo del agregado grueso (ripió) por escoria de fundición de hierro el hormigón tendrá ruptura explosiva y columnar.

En los ensayos de resistencia a compresión y flexión de todas las muestras elaboradas con escoria de fundición de hierro en remplazo parcial del agregado grueso (ripió) en porcentajes de 5%, 10%, 15% se pudo evidenciar un incremento considerable a los 28 días de edad, siendo así que para

los especímenes ensayados a compresión con el 5 % de escoria se obtuvo un valor de 33,54 MPa, 10% de escoria un valor de 35,02MPa, y con el 15% de escoria un valor de 39,02 MPa, en relación al hormigón convencional que alcanzó un valor de 29,87 MPa, pudiendo concluir que a mayor cantidad de remplazo del agregado grueso (ripió) por escoria de hierro mayor será la resistencia a compresión obtenida.

En los especímenes ensayados a flexión no se obtuvo una mayor variación de resistencia del hormigón convencional con el hormigón con escoria de hierro, obteniendo el hormigón de 5% y 10% de escoria un valor de Módulo de rotura (MR) casi similar de 5,27 MPa y 5,28 MPa y el de 15% de escoria un valor de módulo de rotura de 5,35 MPa.

En el análisis estadístico de las muestras se puede concluir que el autor *Montoya -Meseguer -Moran*, obtuvo los resultados confiables ya que considera un coeficiente de variación de resistencia y la resistencia media de las muestras para el cálculo de la resistencia característica del hormigón, obteniendo como resultado que para el hormigón convencional se obtuvo una resistencia característica de 28,42 Mpa, con 5% de escoria se obtuvo una resistencia característica de 32,49 Mpa, la mezcla con el 10% de escoria obtuvo una resistencia característica de 33,05 Mpa, mientras que la mezcla con el 15% de obtuvo un valor de 37,15 Mpa.

Los valores de resistencia aceptable para el hormigón serán los obtenidos luego del análisis estadístico, los mismo que se evidencia en la tabla 11 y que son diferentes a las resistencias medias obtenidas en la tabla 9.

Se debe aclarar que para la utilización de la escoria de fundición de hierro como remplazo parcial del agregado grueso (ripió) en porcentajes de 5%, 10% y 15%, se realizó un tamizado para obtener una

granulometría similar a la del agregado grueso la misma que se evidencia en la tabla 3.

En la investigación se superó la resistencia especificada de 28 MPa, esto se debió tanto a la calidad de los materiales utilizados como al diseño del mismo, obteniendo así las resistencias esperadas.

Esta investigación permitirá la reutilización de la escoria de fundición de hierro, la misma que no dispone de una adecuada disposición final y además permite en forma indirecta la conservación de los recursos naturales usados hasta el día de hoy en la elaboración de hormigones.

Debido a que la escoria de fundición de hierro contiene características químicas similares a las del cemento, permite que las mezclas de hormigón alcancen su resistencia esperada.

Además, dará a conocer una opción constructiva poco usado en nuestro medio, fomentando el uso de este hormigón y dando a conocer sus resultados y beneficios, siendo este el que reunirá diversas cualidades que mejoraran su comportamiento en diferentes facetas con respecto a un hormigón tradicional usado en el ámbito vial.

Se recomienda la continuidad del estudio con mayores porcentajes de sustitución del agregado grueso por escoria de fundición de hierro, para así poder evidenciar hasta que porcentaje de sustitución permite un hormigón trabajable y homogéneo, documentándose si se obtiene o no resistencias aceptables, además se podría investigar la variación de las características físicas y mecánicas del hormigón con el 100% de remplazo del agregado grueso por escoria de fundición de hierro.

El hormigón siendo uno de los materiales más usados en la construcción de vías, estará sujeto a múltiples

investigaciones y estudios, por tal razón sería importante el estudio de la reacción álcali- árido del hormigón con escoria de fundición de hierro, la misma que podría servir para la construcción de vías en diferentes condiciones climáticas en el Ecuador.

Agradecimientos

A toda mi familia, en especial a mi madre Luz María y a mi padre Hugo quienes me dieron la fuerza y la inspiración para poder culminar esta etapa de mi vida.

A mi compañera de vida Liliana Chalco quien con su amor y apoyo nunca dudo de mi capacidad.

Al Ing. Iván Cajas Gerente General de la empresa Funtein Cía. Ltda., por haber brindado todo el apoyo para la realización de esta investigación. Y la Universidad politécnica Salesiana por haberme permitido culminar mis estudios en tan prestigiosa institución.

Referencias

- [1] D. Farinango, “Análisis comparativo de costos entre el pavimento rígido y pavimento flexible” Proyecto de Titulación, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, enero. 2014.
- [2] V. Higuera, “El estado de las vías de pavimento rígido y su incidencia en la circulación del tráfico pesado de la planta Holcim Latacunga del cantón Latacunga Provincia de Cotopaxi” Proyecto de Titulación, Universidad Técnica de Ambato, Quito, Ecuador, enero. 2015.
- [3] J. Reyes, F. Soto “Pavimento de concreto hidráulico en carreteras” Proyecto de Titulación, Instituto Tecnológico de la Construcción A.C, D.F, México, junio. 1996.

- [4] M. Doménech, A. Espinoza, “Determinación de las propiedades físico - mecánicas de los hormigones y morteros utilizando materiales pétreos de la cantera de Pifo, Pomasqui - San Antonio” Proyecto de Titulación, Pontificia Universidad Católica, Quito, Ecuador, enero. 2016.
- [5] L. Orbea, “Optimización de la relación agua /cemento en el diseño de hormigones estándar establecidos en los códigos ACI - ASTM” Proyecto de Titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, junio. 2013.
- [6] J. Chiluisa, “Hormigones de alta resistencia $f'c = 50$ Mpa, utilizando agregados del sector de Pifo y cemento armado especial - Lafarge” Proyecto de Titulación, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, enero. 2014.