



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LATIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO EN
INGENIERÍA CIVIL**

**TEMA: "EVALUACIÓN DEL USO DE ESCORIAS DE ACERO EN
LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN"**

AUTORES: CUÁSQUER GONZÁLEZ, CARMEN JACQUELINE

ALTAMIRANO PROAÑO, SANTIAGO IVÁN

DIRECTOR: ING. DURÁN, RICARDO

CODIRECTOR: ING. BONIFAZ, HUGO Msc.

SANGOLQUÍ

2015

CERTIFICACIÓN

Ing. Ricardo Durán

Ing. Hugo Bonifaz. Msc.

Certifican:

Que el trabajo titulado: "EVALUACIÓN DEL USO DE ESCORIAS DE ACERO EN LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN" fue realizado en su totalidad por la Srta. CARMEN JACQUELINE CUÁSQUER GONZÁLEZ y el Sr. SANTIAGO IVÁN ALTAMIRANO PROAÑO como requerimiento parcial a la obtención del título de INGENIEROS CIVILES.

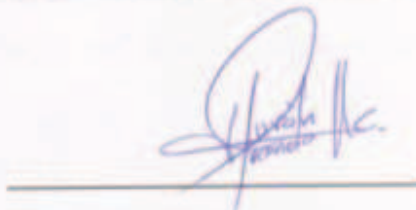
SANGOLQUÍ, 15 DE MAYO DEL 2015




Srta. Carmen Jacqueline Cuásquer González



Sr. Santiago Iván Altamirano Proaño



Ing. Ricardo Durán.
DIRECTOR



Ing. Hugo Bonifaz.
CODIRECTOR

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

CARMEN JACQUELINE CUÁSQUER GONZÁLEZ
Y SANTIAGO IVÁN ALTAMIRANO PROAÑO

Declaramos que:

El proyecto de grado denominado "EVALUACIÓN DEL USO DE ESCORIAS DE ACERO EN LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN" ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando los derechos intelectuales de terceros, conforme a las citas que constan en el texto cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

SANGOLQUÍ, 14 DE MAYO DEL 2015

Consiguientemente este trabajo es de nuestra autoría.

SANGOLQUÍ, 14 DE MAYO DEL 2015



Srta. Carmen Jacqueline Cuásquer González



Sr. Santiago Iván Altamirano Proaño

AUTORIZACIÓN

CARMEN JACQUELINE CUÁSQUER GONZÁLEZ
Y SANTIAGO IVÁN ALTAMIRANO PROAÑO

Autorizamos que:

El proyecto de grado denominado "EVALUACIÓN DEL USO DE ESCORIAS DE ACERO EN LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN" sea publicado en la biblioteca virtual de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

SANGOLQUÍ, 14 DE MAYO DEL 2015



Srta. Carmen Jacqueline Cuásquer González



Sr. Santiago Iván Altamirano Proaño

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a Dios y a mis padres Amelia González y Vicente Cuásquer; recíbanlo como un humilde homenaje por ser mi fuerza y mi gana de salir adelante.

También dedico este trabajo a mi tía Concepción González en agradecimiento de su apoyo como si fuera mi segunda madre.

Jacqueline Cuásquer

DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y darme salud para lograr mis objetivos.

A mis padres Luis Altamirano y Digna Proaño por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, al guiarme en mi educación académica, como de la vida.

A mi Amada esposa Estefanía por ser el complemento ideal en mi vida y por su apoyo absoluto para lograr esta gran meta.

A mi Querido hijo Jeremy Santiago por ser mi inspiración de lucha para llegar a culminar este gran logro que he alcanzado.

A mis hermanos, Galo y Luis, por estar conmigo y apoyarme siempre.

A mis sobrinos, para que vean en mí un ejemplo a seguir.

Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

Santiago Altamirano

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios por darme la fortaleza y sabiduría para estar donde estoy, por bendecirme y cuidar siempre de mi persona. Sin Él nada de esto hubiese sucedido.

Agradezco a mi madre, Amelia González por ser mi fuente de inspiración, mi razón de vivir, el ejemplo de una dama en todo el sentido de la palabra. Gracias madre por ser mi apoyo incondicional de hoy, de siempre y del transcurso de elaboración de este proyecto. Eres el regalo de Dios que nunca alcanzaré a agradecer.

Gracias a mi padre Vicente Cuásquer por guiarme por el camino del bien, enseñarme a ser fuerte, valiente e independiente.

A los ingenieros Ricardo Durán y Fabián Bonifaz por ilustrarme y formarme como profesional.

Gracias al Señor Luis Altamirano por el gran apoyo en esta elaboración de tesis.

A los ingenieros Natalia Bermeo y Juan Haro por su ayuda, por ser el ejemplo de ayuda al prójimo sin esperar nada a cambio y por su amistad.

Jacqueline Cuásquer

AGRADECIMIENTO

Me gustaría agradecer a Dios por derramar bendiciones y llenarme de sabiduría para lograr este sueño tan anhelado.

Agradezco a mi querido padre Luis; quien con su experiencia y conocimientos supo guiarme por un buen camino, de esta manera alcanzar este gran logro, este gran sueño, ahora hecho realidad, Gracias padre.

Agradezco a mi madre Digna; quien con su amor, consejos siempre me supo sacar adelante y me enseña a luchar por la vida cada día. Gracias Madre

Agradezco a mí amada esposa Estefanía, a mi querido hijo Jeremy por dame su apoyo incondicional y ser mi inspiración para salir juntos adelante.

Agradezco a mi compañera de tesis Jacqueline Cuásquer por su dedicación y amistad para llevar a cabo esta investigación y culminarla satisfactoriamente.

De igual manera agradecer a mis profesores de Investigación y de Tesis de Grado, Ing. Ricardo Duran e Ing. Hugo Bonifaz por su visión crítica de muchos aspectos cotidianos de la vida, por su rectitud en su profesión como docente, por sus consejos, que ayudan a formarte como persona e investigador.

Agradezco al Ing. Juan Haro por su paciencia y bondad para ayudarnos de principio a fin en esta investigación.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí.

Santiago Altamirano

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	i
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	vi
AGRADECIMIENTO	vii
RESUMEN	xxvi
ABSTRACT	xxvii
CAPÍTULO 1	1
GENERALIDADES	1
1.1 Introducción.	1
1.2 Metodología.	2
1.3 Estado del arte.	3
1.4 Objetivos.	6
1.4.1 Objetivo General.	6
1.4.2 Objetivos Específicos.	6
CAPÍTULO 2	8

ESCORIAS DE ACERO.....	8
2.1 Definición de escoria de acero.....	8
2.2 Proceso de obtención de las escorias de acero.	9
2.3 Características físicas de la escoria de acero.....	14
2.3.1 Forma, Textura y Color.	15
2.3.1.1 Forma	15
2.3.1.2 Textura.	17
2.3.1.3 Color.....	19
2.3.1.4 Equipo.	20
2.3.1.5 Materiales.	21
2.3.1.6 Procedimiento.....	21
2.3.1.7 Resultados.....	21
2.4 Características químicas.....	22
2.5 Características mineralógicas de la escoria de acero.....	24
2.5.1 Descripción del ensayo Difracción de Rayos X.....	25
2.5.2 Granulometría de la escoria de acero. ASTM C 136.....	29
2.5.2.1 Equipo.	29
2.5.2.2 Materiales.	29
2.5.2.3 Procedimiento.....	30

2.5.2.4	Resultados.....	32
2.5.3	Peso específico y absorción de la escoria de acero. ASTM C 128.....	33
2.5.3.1	Equipo.	33
2.5.3.2	Materiales.	34
2.5.3.3	Procedimiento.....	34
2.5.3.4	Resultados.....	35
2.5.4	Densidad suelta y compactada de la escoria de acero. ASTM C 29.....	35
2.5.4.1	Equipo.	36
2.5.4.2	Materiales.	37
2.5.4.3	Procedimiento.....	37
2.5.4.4	Resultados.....	38
2.5.5	Contenido de humedad en el agregado por secado de la escoria de acero. ASTM C 566.	39
2.5.5.1	Equipo.	39
2.5.5.2	Materiales.	40
2.5.5.3	Procedimiento.....	41
2.5.5.4	Resultados.....	42
CAPÍTULO 3	44

ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....	44
3.1 Caracterización del cemento portland.....	44
3.1.1 Determinación de la densidad del cemento. ASTM C 188.	44
3.1.1.1 Equipo.	44
3.1.1.2 Materiales.	45
3.1.1.3 Procedimiento.....	46
3.1.1.4 Resultados.....	47
3.1.2 Determinación de la consistencia normal del cemento hidráulico. Método Vicat. ASTM C 187.	48
3.1.2.1 Equipo.	48
3.1.2.2 Materiales.	49
3.1.2.3 Procedimiento.....	50
3.1.2.4 Resultados.....	52
3.1.3 Determinación del tiempo de fraguado del cemento hidráulico. Método Vicat. ASTM C 191.	53
3.1.3.1 Equipo	53
3.1.3.2 Materiales.	54
3.1.3.3 Procedimiento.....	55
3.1.3.4 Resultados.....	57

3.2	Características de los agregados naturales.....	58
3.2.1	Análisis granulométrico por tamizado. ASTM C 136.	59
3.2.1.1	Granulometría del agregado grueso.	59
3.2.1.2	Estabilización granulométrica del agregado grueso.	61
3.2.1.3	Granulometría del agregado fino.	68
3.2.1.4	Estabilización granulométrica de la escoria de acero.....	71
3.2.1.5	Combinaciones de agregado fino y escoria de acero.	72
3.2.2	Gravedad específica y absorción del agregado fino, grueso y escoria de acero. ASTM C 127 y ASTM C 128.....	78
3.2.3	Densidad suelta y compactada de agregado fino, grueso y escoria de acero. ASTM C 29.....	80
3.2.4	Contenido de humedad en el agregado fino, grueso y escoria de acero por secado. ASTM C 566.....	81
3.2.5	Determinación del valor de la degradación del árido grueso mediante el uso de la Máquina de los Ángeles. ASTM C 131.	82
3.2.5.1	Equipo.	83
3.2.5.2	Materiales.	84
3.2.5.3	Procedimiento.....	85
3.2.5.4	Resultados.....	86
3.3	Resumen de caracterización de agregado grueso, fino y siderúrgico.	87

CAPÍTULO 4.....	89
DISEÑO DE DOSIFICACIÓN Y DISEÑO EXPERIMENTAL PARA HORMIGÓN HIDRÁULICO CONVENCIONAL Y HORMIGÓN HIDRÁULICO CON ESCORIA DE ACERO.....	89
4.1 Hormigón hidráulico convencional con materiales estándares: arena, grava, cemento y agua.....	95
4.2 Hormigón hidráulico con escoria: escoria de acero, grava, cemento y agua.....	99
4.3 Hormigón hidráulico con escoria y aditivo: escoria de acero, grava, cemento, agua y aditivo.	101
4.4 Ensayos del hormigón hidráulico en estado fresco.....	103
4.4.1 Muestreo del concreto recién mezclado, ASTM C172.	103
4.4.1.1 Muestreo.....	103
4.4.1.2 Procedimiento.....	104
4.4.1.3 Resultados.....	105
4.4.2 Temperatura del concreto con cemento portland recién mezclado, ASTM C 1064.	106
4.4.2.1 Equipo.	107
4.4.2.2 Muestreo del concreto.	108
4.4.2.3 Procedimiento.....	108

4.4.2.4	Resultados.....	109
4.4.3	Determinación del asentamiento del hormigón de cemento hidráulico. ASTM C 143.....	110
4.4.3.1	Equipos.....	110
4.4.3.2	Muestreo.....	111
4.4.3.3	Procedimiento.....	111
4.4.3.4	Resultados.....	114
4.4.4	Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo. ASTM C31.....	115
4.4.4.1	Equipos.....	115
4.4.4.2	Muestreo del hormigón.....	117
4.4.4.3	Procedimiento.....	117
4.4.4.4	Curado.....	123
4.5	Ensayos del hormigón en su estado de endurecimiento.....	124
4.5.1	Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico. ASTM C 39.....	124
4.5.1.1	Equipos.....	125
4.5.1.2	Especímenes.....	125
4.5.1.3	Procedimiento.....	125
4.5.1.4	Resultados.....	128

4.5.2	Determinación del módulo de elasticidad del concreto en compresión. ASTM C 469.....	132
4.5.2.1	Equipo.	133
4.5.2.2	Especímenes de ensayo.	134
4.5.2.3	Procedimiento.....	134
4.5.2.4	Resultados.....	136
4.5.3	Determinación de la resistencia a la flexión del hormigón (utilizando una viga simple con carga en los tercios). ASTM C 78.	141
4.5.3.1	Equipo.	141
4.5.3.2	Especímenes de ensayo.	141
4.5.3.3	Procedimiento.....	142
4.5.3.4	Resultados.....	144
4.5.4	Determinación de la resistencia a la tracción indirecta. ASTM C496.....	148
4.5.4.1	Equipos y materiales.	148
4.5.4.2	Procedimiento.....	149
4.5.4.3	Resultados.....	151
4.5.5	Análisis del hormigón producido con respecto a la Norma Ecuatoriana de la construcción vigente (NEC-11).	152
CAPÍTULO 5	153

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	153
5.1 Conclusiones.....	153
5.2 Recomendaciones.....	154
5.3 Bibliografía.....	156

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de las partículas según su forma.	15
Tabla 2. Clasificación de la textura superficial de los agregados.....	18
Tabla 3. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público.	24
Tabla 4. Tamaño de la muestra para ensayo del árido grueso.....	29
Tabla 5. Tamaño de la muestra de agregados.	41
Tabla 6. Requisitos para el aparato Vicat.	48
Tabla 7. Especificaciones de carga.	84
Tabla 8. Gradación de las muestras de ensayo.....	85
Tabla 9. Secuencia de pasos para la dosificación de mezclas.	90
Tabla 10. Valores de asentamiento recomendados para diversas clases de construcción.....	91
Tabla 11. Contenido aproximado de aire en el concreto para varios grados de exposición.....	92
Tabla 12. Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y TMN del agregado.	94
Tabla 13. Relación entre la resistencia a la compresión y algunos valores de la relación a/c	94
Tabla 14. Volumen de gravilla por unidad de volumen de concreto.....	95
Tabla 15. Requisitos para el diámetro de la varilla de compactación	116
Tabla 16. Requisitos para determinar el método de compactación.	118

Tabla 17. Requisitos para el moldeo mediante varillado.....	119
Tabla 18. Tolerancia de tempo admisible para el ensayo de especímenes....	126

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Test TCLP de la escoria de acero.....	23
Cuadro 2. Porcentajes de las aleaciones presentes en la escoria de acero.	27
Cuadro 3. Ensayo ASTM C 136 de la escoria de acero.....	32
Cuadro 4. Ensayo de peso específico y absorción de la escoria siderúrgica. ..	35
Cuadro 5. Ensayo ASTM C 29 de la escoria de acero.....	38
Cuadro 6. Resumen de caracterización escoria de acero directa.....	43
Cuadro 7. Resultados de la densidad del cemento.....	47
Cuadro 8. Determinación de la consistencia normal del cemento.	52
Cuadro 9. Tiempos de fraguado del cemento.	57
Cuadro 10. Granulometría agregado grueso, muestra 1.	59
Cuadro 11. Granulometría agregado grueso, muestra 2.	60
Cuadro 12. Granulometría de la primera combinación 20% de 3/4" y 80% de 1/2".	66
Cuadro 13. Granulometría de la segunda combinación 30% de 3/4" y 70% de 1/2".	67
Cuadro 14. Granulometría del agregado fino, muestra 1.....	68
Cuadro 15. Granulometría del agregado fino, muestra 2.....	70
Cuadro 16. Granulometría de la escoria de acero, muestra 2.	71
Cuadro 17. Granulometría de 10% de escoria de acero y 90% de agregado fino.	73

Cuadro 18. Granulometría de 20% de escoria de acero y 80% de agregado fino.....	74
Cuadro 19. Granulometría de 30% de escoria de acero y 70% de agregado fino.....	75
Cuadro 20. Gravedad específica y absorción del agregado fino.....	78
Cuadro 21. Gravedad específica y absorción del agregado grueso.....	79
Cuadro 22. Gravedad específica y absorción de la escoria siderúrgica.....	79
Cuadro 23. Ensayo ASTM C 29 del agregado fino.....	80
Cuadro 24. Ensayo ASTM C 29 del agregado grueso.....	80
Cuadro 25. Ensayo ASTM C 29 de la escoria de acero.....	81
Cuadro 26. Ensayo ASTM C 566 del agregado fino.....	81
Cuadro 27. Ensayo ASTM C 566 del agregado grueso.....	82
Cuadro 28. Ensayo ASTM C 566 de la escoria de acero.....	82
Cuadro 29. Resultado de gradación del árido grueso.....	86
Cuadro 30. Resumen de caracterización de agregados.....	87
Cuadro 31. Dosificación de hormigón hidráulico convencional $f'c = 210$ kg/cm^2	97
Cuadro 32. Dosificación de hormigón hidráulico con escoria de acero de 210 Kg/cm^2	100
Cuadro 33. Resumen de materiales de dosificación de hormigón con escoria de acero y aditivo.....	102
Cuadro 34. Acta de muestreo de hormigón convencional.....	105

Cuadro 35. Acta de muestreo de hormigón con escoria de acero.	106
Cuadro 36. Acta de muestreo de hormigón con escoria de acero y aditivo.	106
Cuadro 37. Resultados del ensayo de temperatura del concreto recién mezclado.	109
Cuadro 38. Resultados del ensayo de asentamiento del concreto recién mezclado.	114
Cuadro 39. Resultados de la resistencia a la compresión del H.C, H.E, H.E.A a los 4 días (curado rápido).	128
Cuadro 40. Resultados de la resistencia a la compresión del H.C, H.E, H.E.A a los 7 días.	129
Cuadro 41. Resultados de la resistencia a la compresión del H.C, H.E, H.E.A a los 14 días.	130
Cuadro 42. Resultados de la resistencia a la compresión del H.C, H.E, H.E.A a los 28 días.	131
Cuadro 43. Resultado del módulo de elasticidad del hormigón hidráulico convencional.	136
Cuadro 44. Resultado del módulo de elasticidad del hormigón hidráulico con escoria de acero.	137
Cuadro 45. Resultado del módulo de elasticidad del hormigón hidráulico con escoria de acero y aditivo.	139
Cuadro 46. Resumen de resultados del módulo de elasticidad del H.C, H.E y H.E.A.	140
Cuadro 47. Resultados del módulo de rotura obtenidos a los 7 días.	145

Cuadro 48. Resultados del módulo de rotura obtenidos a los 14 días.....	146
Cuadro 49. Resultados del módulo de rotura obtenidos a los 28 días.....	147
Cuadro 50. Resultados de ensayo de tracción indirecta.....	151
Cuadro 51. Análisis del hormigón producido con respecto al NEC-11.....	152

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Escoria de acero directamente extraída de la empresa siderúrgica. ...	8
Figura 2. Ubicación geográfica de la Empresa siderúrgica.....	9
Figura 3. Ingreso de la chatarra ferrosa al horno de arco eléctrico.....	10
Figura 4. Fundición de la chatarra ferrosa en el horno de arco eléctrico.	11
Figura 5. La escoria es expulsada de la olla.....	12
Figura 6. Evacuación del acero líquido del horno de arco eléctrico.....	13
Figura 7. Moldeo del acero líquido en lingoteras rectangulares.....	14
Figura 8. Forma del árido siderúrgico.	16
Figura 9. Árido siderúrgico áspero con poros y cavidades visibles.....	19
Figura 10. Tablas de colores Munsell.	20
Figura 11. Muestra de escoria de acero.	21
Figura 12. Definición del color de la escoria en las tablas Munsell.....	21
Figura 13. Difractogramas de muestras 1 y 2 ensayadas.....	26
Figura 14. Equipo para ensayo ASTM C 136.....	29
Figura 15. Muestra para ensayo ASTM C 136.....	30
Figura 16. Equipo para realizar el ensayo ASTM C 128.....	34
Figura 17. Muestra de escoria para realizar el ensayo ASTM 128.	34
Figura 18. Equipo para ensayo ASTM C 29.	36
Figura 19. Muestra para el ensayo ASTM C 29.....	37
Figura 20. Equipo para ensayo ASTM C 566.....	40

Figura 21. Muestra para ensayo ASTM C 566.....	41
Figura 22. Equipo para realizar el ensayo ASTM C 188.....	45
Figura 23. Materiales para ensayo ASTM C 188.....	46
Figura 24. Equipo para ensayo ASTM C 187.....	49
Figura 25. Materiales para ensayo ASTM C 187.....	50
Figura 26. Equipo para ensayo ASTM C191.....	54
Figura 27. Método gráfico de la Road Note Laboratory.....	63
Figura 28. Primera estabilidad granulométrica.....	65
Figura 29. Segunda estabilidad granulométrica.....	65
Figura 30. Conjunto de curvas granulométricas de combinaciones arena - escoria y curva granulométrica solo de escoria de acero.....	77
Figura 31. Equipo para ensayo ASTM C 131.....	84
Figura 32. Muestra de agregado grueso para el ensayo de abrasión.....	85
Figura 33. Requerimientos de agua de mezclado.....	93
Figura 34. Mezclador estacionario inclinado utilizado en la fundición.....	105
Figura 35. Equipo y muestra para realizar el ensayo de temperatura.....	107
Figura 36. Equipo para realizar en ensayo de asentamiento.....	111
Figura 37. Equipo para elaboración de especímenes: cilindros y vigas.....	117
Figura 38. Elaboración de especímenes para ensayo ASTM C 31.....	120
Figura 39. Elaboración de especímenes para ensayo ASTM C31.....	120
Figura 40. Identificación de especímenes: a- cilindros de hormigón convencional; b- cilindros de hormigón con escoria de acero; c- cilindros de	

hormigón con escoria y aditivo; d- vigas de hormigón convencional; e- vigas de hormigón con escoria; f- vigas de hormigón con escoria y aditivo....	122
Figura 41. Curado inicial de los especímenes: cilindros y vigas.	123
Figura 42. Curado final de especímenes: cilindros y vigas.	124
Figura 43. Esquema de los modelos típicos de fractura.	127
Figura 44. Fracturas de probetas cilíndricas: a- hormigón convencional; b- hormigón con escoria de acero; c- hormigón con escoria de acero y aditivo..	132
Figura 45. Ensayo para determinar el módulo de elasticidad	134
Figura 46. Procedimiento para la determinación de la resistencia a la flexión.	143
Figura 47. Fractura de vigas en el tercio medio de la luz libre de las mismas.	144
Figura 48. Ensayo de tracción indirecta.	149

RESUMEN

El incremento vertiginoso de materiales residuo frente a el reciclaje es actualmente un gran contexto de investigación en el campo de la construcción, ya que hoy por hoy reciclar es generar nuevos materiales de construcción, un ejemplo de material reciclado es la escoria de acero proveniente de los altos hornos de las empresas siderúrgicas, la escoria de acero en su mayoría se almacena sin propósito alguno e incluso se deshecha en rellenos sanitarios para evitar pérdidas del área de trabajo en las industrias del acero; entonces a dicha escoria de acero en este proyecto se le ha tratado y ensayado como un árido fino natural destinado a la producción de hormigón hidráulico y al efectuar estos procedimientos ha dado excelentes resultados; no obstante también se señala que el hormigón producido con escoria de acero sería bastante útil para la fundición de todo tipo de cimentaciones y losas sobre piso debido a que es 1.37 veces más pesado que un agregado fino de origen natural. El hormigón hidráulico con escoria de acero realizado en este proyecto presenta un incremento del 33.17% en la resistencia a la compresión, 26.77% en la resistencia a la flexión, 26.87% en el módulo de elasticidad, 39.72% en la resistencia a la tracción; todo esto en comparación con el hormigón hidráulico elaborado con materiales convencionales.

PALABRAS CLAVES

- **ESCORIA DE ACERO**
- **EVALUACIÓN**
- **AGREGADO FINO**
- **HORMIGÓN HIDRÁULICO**
- **COMPRESIÓN SIMPLE**

ABSTRACT

The rapid increase of waste materials against recycling is currently a great backdrop for research in the field of construction, and that today recycling is generating new building materials, an example of recycled material is steel slag from the blast furnaces of steel companies, steel slag is stored mostly aimless and even undone in landfills to avoid losses workspace in the steel; then to said steel slag in this project have been treated and tested as a natural fine aggregate for the production of hydraulic concrete and perform these procedures has yielded excellent results; however also it noted that the concrete produced with steel slag would be quite useful for casting all types of foundations and floor slabs on because it is 1.37 times heavier than a fine aggregate of natural origin. The hydraulic concrete with steel slag performed in this project has a 33.17% increase in compressive strength, 26.77% in the flexural strength, 26.87% in the modulus of elasticity, 39.72% in tensile strength; all this in comparison with the hydraulic concrete made with conventional materials.

KEYWORDS

- **STEEL SLAG**
- **EVALUATION**
- **FINE AGGREGATE**
- **HYDRAULIC CONCRETE**
- **SIMPLE COMPRESSION**

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 Introducción.

El reciclaje es sujeto de vanguardia en el siglo XXI; el cual es un proceso que tiene como propósito convertir los desechos en nuevos productos para prevenir el desuso de probables materiales potencialmente útiles, reduciendo el consumo de nueva materia prima y así favorecer a la preservación del medio ambiente.

Para el efecto, se han ido estableciendo ciertos controles de regulación exigidos a las industrias, como el TULAS (Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente) que es el estatuto que rige en el Ecuador, al cual deben someterse las empresas, como son las compañías siderúrgicas, que acumulan una gran cantidad de escoria de acero producto de la fundición de la chatarra ferrosa para la producción de acero.

Hoy en día en las industrias siderúrgicas, se produce 30 000.00 toneladas de acero mensuales y aproximadamente el 8% de esta producción es escoria, es decir, se emite 2 400.00 toneladas de escoria y residuos ferrosos

mensuales. Esta escoria es tamizada y triturada, gran parte de la escoria fina es vendida a las Compañías Cementeras, y las usan como puzolanas, mismo que es un componente para la elaboración del cemento, la parte sobrante de la escoria continua acumulándose hasta que las industrias productoras de cemento la demanden, caso contrario la escoria de acero debe ser depositada en rellenos sanitarios en cumplimiento de TULAS, evitando también su acumulación y pérdida de espacio de trabajo, siendo así las cosas las empresas siderúrgicas requieren estudios que innoven a la escoria como un material reciclado, para usarse como material de construcción, específicamente como elemento de hormigones para diversos tipos de obras civiles. Por ello y dentro de las medidas de protección ambiental se busca incluir la escoria de acero a manera de constituyente en la producción de hormigón amigable con el medio ambiente (L. Albuja, comunicación personal, 6 de mayo de 2014).

1.2 Metodología.

El presente proyecto de grado induce al estudio general de la escoria de acero proveniente de los altos hornos de arco eléctrico y afino, se inicia con una descripción del proceso de obtención de la escoria, sus características físicas, químicas, mineralógicas y mecánicas puesto que en esta tesis a la escoria se le da el trato como árido fino para elaboración de hormigones; también se analizan las características del cemento portland y de los materiales convencionales de

producción de hormigón (arena y grava) extraídos de la ribera del río Pita; para luego proceder con el diseño de dosificaciones.

Las dosificaciones de hormigones estándares se las realizan usando el método ACI 211.1-91; a las proporciones de ese diseño se las adecua al hormigón con escoria e inmediatamente después se analiza las características del hormigón en su estado fresco, y en estado endurecido tomando especímenes cilíndricos para determinar la resistencia a la compresión y probetas tipo vigas para determinar la resistencia a flexión y módulo de rotura de las diferentes dosificaciones: el hormigón convencional, que sirve de unidad patrón, el hormigón con escoria propuesto en este proyecto y el hormigón con escoria e inhibidor de corrosión.

Posteriormente se realiza un análisis de los resultados obtenidos tanto de los ensayos de hormigones comunes como de los hormigones con contenido de escorias, para definir las ventajas y desventajas que presenta y finalmente, se efectuará un análisis del hormigón producido con respecto a la Norma Ecuatoriana de la Construcción vigente (NEC-11).

1.3 Estado del arte.

Actualmente, uno de los principales problemas medioambientales es la contaminación industrial, incluido el sector de la construcción, debido al desalojo de desechos de materiales residuos, el movimiento de tierras, la

construcción de edificaciones nuevas y obras de infraestructura, así como los generados por la demolición o reparación de edificaciones antiguas.

El hormigón común contiene aproximadamente un 12% de cemento y 80% de agregados en masa. Esto significa que globalmente, para hacer el hormigón, se están consumiendo arena, grava, y roca triturada a una velocidad de 10 a 11 billones de toneladas por año. Las operaciones de extracción, procesado, y transporte que involucran tales cantidades de agregados consumen a su vez, cantidades considerables de energía, y afectan adversamente la ecología en las áreas forestadas y lechos de los ríos (Metha, 2001).

En Norte América, Europa, y Japón, alrededor de las dos terceras partes de los residuos de la construcción y demolición consisten de polvo de hormigón antiguo o albañilería. Esto presenta una gran oportunidad para la industria del hormigón de mejorar la productividad de recursos usando agregado grueso obtenido de los residuos de la construcción y demolición. En muchas partes del mundo, se pueden procesar arena limpias y residuos de minería para usar como agregado fino. Reciclando estos residuos a pesar de que algo del costo de procesamiento se está volviendo económico, particularmente en países donde la tierra es escasa y los costos de disposición de residuos son muy altos. Además los depósitos vírgenes de agregados han sido ya deprimidos en muchas

áreas, y los agregados transportados a grandes distancias pueden ser mucho más costosos que el uso de recursos libre o de bajo costo del agregado local reciclado. El hormigón reciclado, en algunos casos, se está usando como relleno de carreteras, pero está en un ciclo negativo en el sentido que el agregado virgen continúa siendo usado para hacer nuevo hormigón (Metha, 2001).

En el Ecuador ya es una realidad la falta de agregados duros para la elaboración del hormigón, por lo tanto una alternativa podría ser el uso de escorias de acero como agregado artificial, para reemplazar el agregado fino de origen natural proveniente de canteras y ríos.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo General.

Determinar la utilidad de agregar escorias de acería en la dosificación y producción de hormigón hidráulico, de tal manera que se innove como un material provechoso en proyectos sostenibles a futuro, contribuyendo en la reducción del impacto ambiental.

1.4.2 Objetivos Específicos.

- Establecer la dosificación apropiada de acuerdo al ACI 211.1-91 Diseño de mezclas de concreto de peso normal; para diseñar el hormigón hidráulico convencional de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y en base a este dosificar el hormigón hidráulico con escoria siderúrgica.
- Determinar las resistencias del hormigón hidráulico convencional y hormigón hidráulico con escoria de acero, a compresión, tracción y a flexión, mediante la preparación de probetas cilíndricas y vigas para ensayos de tres puntos.

- Evaluar y distinguir las diferencias entre el hormigón dosificado con agregados convencionales y el hormigón dosificado con escoria de acero en reemplazo del agregado fino de origen natural, así como también sus ventajas y desventajas.
- Determinar si la producción del hormigón diseñado con escoria de acero cumple con lo estipulado en la NEC-11 (Norma Ecuatoriana de la Construcción).
- Conocer las características de la escoria triturada mediante los ensayos de granulometría, peso específico, absorción, densidad varillada, densidad compactada, contenido de humedad, difracción de rayos x, Test TCLP (Procedimiento de Lixiviación Característico de Toxicidad) y lecturas de Absorción Atómica.

CAPÍTULO 2

ESCORIAS DE ACERO.

2.1 Definición de escoria de acero.

La escoria de acero utilizada en esta tesis es la escoria de acero negra, procedente de los altos hornos de arco eléctrico y afino, haciendo esta aclaración se procede a definirla.

La escoria de acero negra es el conjunto de aleaciones ferrosas, siendo las más prominentes: el trióxido de titanio y hierro (FeTiO_3), óxido de magnesio (MgO), trióxido de carbono y magnesio (MgCO_3), y óxido de hierro (FeO); obtenidas en conjunto como un subproducto de la fundición de chatarra ferrosa para la producción de acero, sometidas a 1600°C en el horno de arco eléctrico y afino.



Figura 1. Escoria de acero directamente extraída de la empresa siderúrgica.

2.2 Proceso de obtención de las escorias de acero.

Las empresas siderúrgicas empezaron a laborar en el Ecuador desde el año 1963 aproximadamente, por ejemplo una de las instalaciones siderúrgicas que existe en el país, está ubicada en la parroquia Alóag, cantón Mejía, provincia de Pichincha



Figura 2. Ubicación geográfica de la Empresa siderúrgica.

Fuente: (GOOGLE EARTH, 2014)

El desarrollo del proceso de obtención de las escorias de acero se la describe por pasos para una mejor comprensión de este apartado.

1er paso. Preselección e ingreso de la chatarra ferrosa al horno de arco eléctrico.

Inicialmente los recicladores minoristas y mayoristas recolectan el material de los talleres metalmecánicos, industrias, botaderos de basura, etc., y lo

entregan en los centros de acopio, donde la chatarra es clasificada, compactada y triturada con la ayuda de la máquina shredder, su propósito es comprimir el material reciclado para ganar volumen en la olla; después de ser preseleccionada y procesada, esta chatarra ferrosa adopta la forma de viruta, de esta forma está lista para ser añadida a la sesta de carga, ser depositada en el horno eléctrico y dar inicio al proceso de fusión del acero.

El horno de arco eléctrico, como su nombre lo indica, se calienta a través de su arco eléctrico. Puede proporcionar temperaturas de hasta 1930°C, dicho horno controla la temperatura con un alto grado de precisión; debido a que no emplea combustible alguno, no se introduce ningún tipo de impurezas y por ende el resultado es un acero de lo más limpio (Huerta O`Valle, Maldonado Madrigal, & Espinosa Villarreal, 2014).

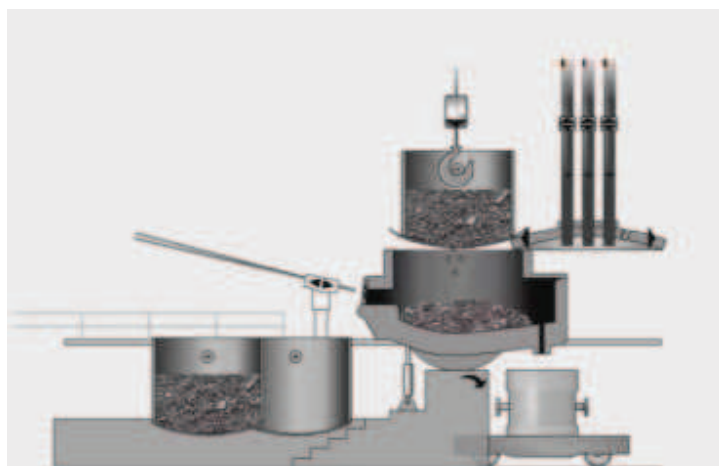


Figura 3. Ingreso de la chatarra ferrosa al horno de arco eléctrico.

Fuente: (Steeluniversity, 2013)

2do paso. Fundición de la chatarra ferrosa en el horno de arco eléctrico.

El horno de arco eléctrico de la planta siderúrgica abarca 30 toneladas, el cual funde la chatarra con el proceso de arco eléctrico, salta el arco eléctrico debido al contacto de los electrodos con la chatarra, se asemeja al proceso de soldadura común pero en un formato macro. La chatarra se funde con la inyección de oxígeno en un rango de 1580°C a 1620°C de temperatura; se realiza 3 cargas de chatarra para llenar la olla del horno en su totalidad. Toma entre 25 y 30 minutos la fundición de cada carga de chatarra; al día se realizan 16 cargas, exceptuando dos días en los cuales se hace la limpieza y mantenimiento al horno.

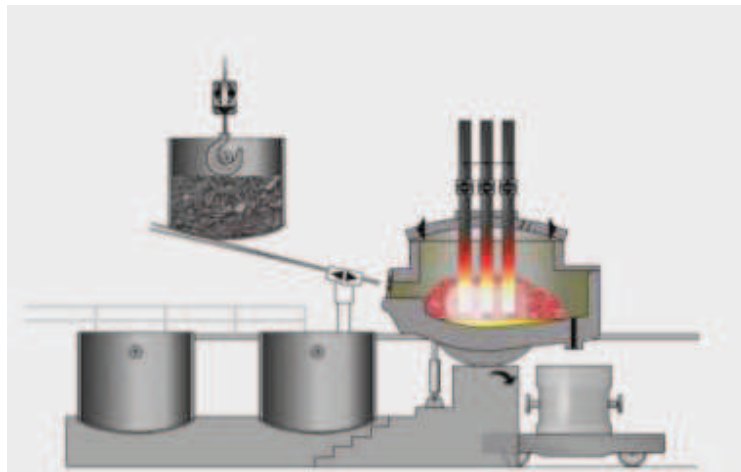


Figura 4. Fundición de la chatarra ferrosa en el horno de arco eléctrico.

Fuente: (Steeluniversity, 2013)

3er paso. Obtención de la escoria de acero.

Una vez fundida la chatarra ferrosa, inmediatamente la escoria se proyecta con fuerza hacia la parte superior de la olla, creando una capa externa semejante a la nata de la leche cuando está en el punto de ebullición; mientras que el acero líquido obtenido se queda en el fondo de la olla. La capa externa de escoria es separada del acero líquido por acciones mecánicas y se evacua detrás del horno de arco eléctrico, se enfría y la escoria queda solidificada.

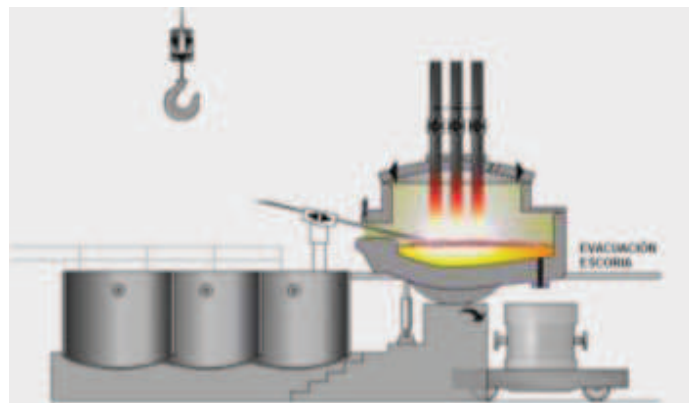


Figura 5. La escoria es expulsada de la olla.

Fuente: (Steeluniversity, 2013)

4to paso. Colado del acero líquido.

Al tener el acero líquido, en la parte inferior de la olla se abre un buquete, que es como una puerta por donde cae el acero fundido y se realiza el proceso de colado, es decir, que todo lo que se convirtió en acero líquido pase a una nueva olla y siga con el proceso de afinamiento.

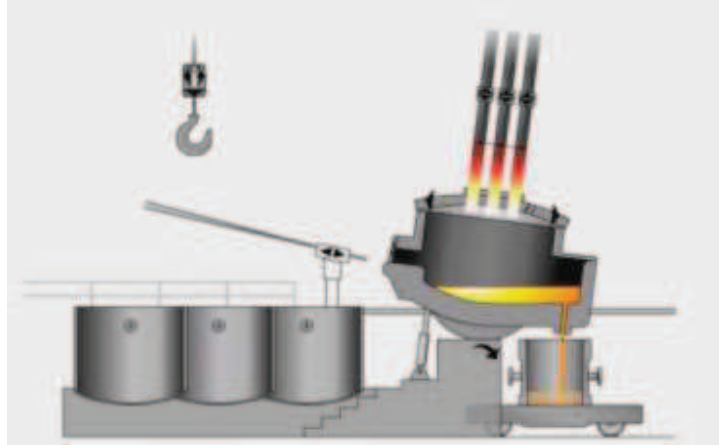


Figura 6. Evacuación del acero líquido del horno de arco eléctrico.

Fuente: (Steeluniversity, 2013)

5to paso. Afinamiento y curado continuo del acero.

En el afinamiento, al acero líquido se le añade ferroaleaciones, alrededor de 28 ingredientes como son cal, cal cálcica, cal dolomítica, manganeso, fósforo, silicio, etc., que le dan al acero las propiedades necesarias para que cumpla con las normas INEN y los productos sean de calidad.

La mezcla anterior pasa al horno cuchara, en este se funde el acero líquido con las 28 ferroaleaciones para pasar al proceso de curado continuo, en el que se solidifica el acero y se obtiene el acero en forma de barras.

Al acero líquido se le da la forma de barras en las lingoteras, son moldes rectangulares en donde se va vertiendo el acero líquido en tres líneas, es un proceso continuo en el cual a las barras se las va cortando dependiendo de la dimensión que se necesite para obtener en laminados los diferentes productos

de acero como son ángulos, perfiles, formas T, platinas y varillas (A. Gutiérrez, comunicación personal, 12 de febrero de 2015).

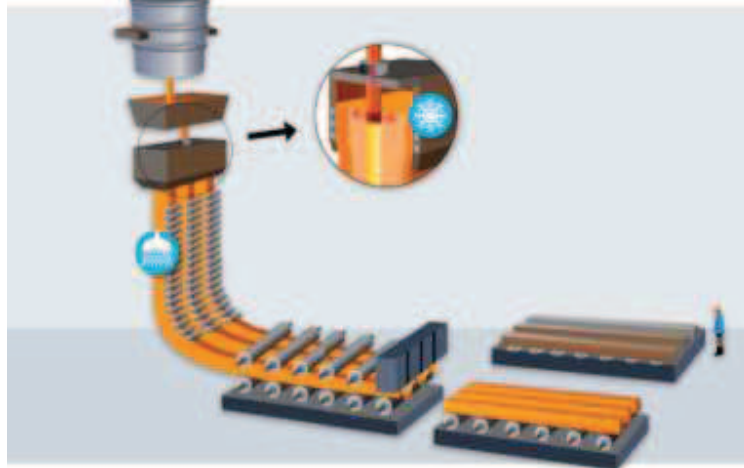


Figura 7. Moldeo del acero líquido en lingoteras rectangulares.

Fuente: (World Steel Association, 2012)

2.3 Características físicas de la escoria de acero.

Dentro de lo que concierne a las características físicas de la escoria de acero, se presenta en primera instancia la forma, el color, y textura. Después se determina su granulometría, peso específico y absorción, densidad varillada y suelta y el contenido de humedad, ya que a la escoria de acero se le ensaya de igual forma que al agregado fino y grueso de origen natural destinados a la producción de hormigón.

2.3.1 Forma, Textura y Color.


2.3.1.1 Forma

La forma del agregado influye directa o indirectamente en el comportamiento del concreto ya que se relaciona con la trabajabilidad, la resistencia y otras propiedades que se distinguen en el estado del concreto ya sea fresco o endurecido. En todo caso, las formas perjudiciales son las alargadas y/o escamosas, colectivamente un ligero exceso de granos de estas formas puede afectar la trabajabilidad. Sin embargo, con la granulometría satisfactoria, tanto los agregados triturados como los no triturados (de un mismo tipo de roca), generalmente, producen concretos con la misma resistencia, si se mantiene el contenido de cemento. Los agregados angulares o con granulometría pobre también pueden ser más difíciles de bombear.

La clasificación por la forma de las partículas está descrita en la Norma INEN 872 Requisitos para áridos de hormigón, como se describe en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de las partículas según su forma.

Clasificación	Descripción
Redondeada	Totalmente desgastada por el agua o completamente limitada por frotamiento.
Irregular	Irregularidad natural, o parcialmente limitada por frotamiento y con caras redondeadas.
Angular	Posee caras bien definidas, que se forman en la intersección de las caras más o menos planas.

CONTINÚA 

Escamosa	Material en el cual el espesor es pequeño (laminar) en relación con las otras dos dimensiones.
Elongada	Material normalmente angular, en el cual la longitud es considerablemente mayor que las otras dos dimensiones.
Escamosa y elongada	Material cuya longitud es considerablemente mayor que el ancho y este es considerablemente mayor que el espesor.

Fuente: (INEN 872, 2011)

Para determinar la forma de la escoria siderúrgica se tomó una muestra de 50.00 gramos, se examinaron las partículas y a simple vista se descarta la posibilidad que la escoria sea redondeada o irregular, puesto que no tiene ninguna de sus caras redondeadas como lo especifica la clasificación irregular; ni posee caras bien definidas. La escoria se adapta a la clasificación escamosa y elongada en un 80% de la muestra tomada, porque su longitud es considerablemente mayor que el ancho y el ancho es mayor a su espesor.



Figura 8. Forma del árido siderúrgico.

2.3.1.2 Textura.

La textura es el aspecto que presenta la superficie de una materia o de un objeto. Todo material posee en su superficie una textura propia que lo diferencia de otro. La escoria de acero se ajusta al tipo de textura artificial. Las texturas artificiales son las obtenidas por el hombre mediante procesos de manipulación de las texturas naturales. La textura es de especial importancia por su influencia en la adherencia entre los agregados y la pasta de cemento fraguado, así como también por su efecto sobre las propiedades del concreto endurecido, tales como la densidad, resistencia a la compresión, a la flexión, cantidad requerida de agua, etc.

Es deseable que las partículas tengan superficie áspera, para que haya buena adherencia con la pasta de cemento, especialmente en los hormigones de alta resistencia (280 Kg/cm^2). Sin embargo, haciendo ajustes necesarios en el diseño de la mezcla, con otros tipos de textura en los agregados también se puede hacer buen hormigón hidráulico.

La clasificación de la textura de los áridos para hormigón está descrita en la Norma INEN 872 y se la muestra en la Tabla 2, la cual divide las superficies en 5 grupos.

Tabla 2. Clasificación de la textura superficial de los agregados.

GRUPO	TEXTURA SUPERFICIAL	CARACTERISTICAS	EJEMPLO
1	Vítrea	Fractura concoidea	Pedernal negro
2	Suave	Lisura, debida a la fractura de rocas laminares o de grano fino.	Horsteno, pizarra, mármol, alguna riolita.
3	Granular	Fractura que presenta granos redondeados más o menos uniformes.	Arenisca, oolitas
4	Cristalina	Contiene constituyentes cristalinos fácilmente visibles.	Fina: basalto, traquita, queratófiro. Media: dolerita, granofiro, granulita, microgranito, algunas calizas, muchas dolomitas. Gruesa: gabro, gneis, granito, granodiorita, sienita.
5	Panaloide y porosa	Con poros y cavidades visibles.	Escoria, piedra p6 mes, trass.

Fuente: (INEN 872, 2011)

Al observar un conjunto de escorias tomadas aleatoriamente (50.00 gramos) se determina que pertenece grupo 5, es panaloide y porosa ya que presenta poros y cavidades visibles, cabe mencionar que la escoria es un árido artificial y se lo está adecuando a las disposiciones de un árido destinado a la producción de hormigón hidráulico.

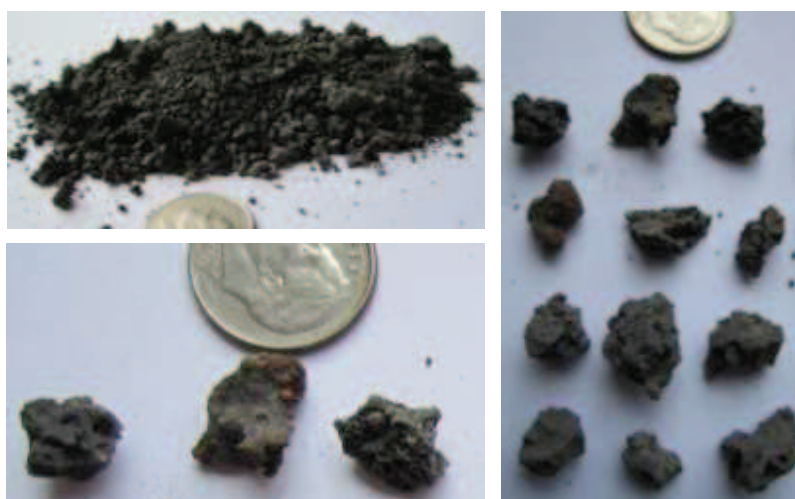


Figura 9. Árido siderúrgico áspero con poros y cavidades visibles.

2.3.1.3 Color.

Soil Survey Division Staff (Citado por Ovalles, 2003) hace hincapié que "el color de las rocas, suelos, plantas, etc.; es una las características morfológicas más importantes, la más obvia y fácil de determinar". La importancia del color radica en que esta da atributos que hacen referencia a la presencia de ciertos minerales, entre ellos: hematita, goetita, lepidocrecita, calcita y familias; de estos la hematita y la calcita son componentes de las escorias negras que se

están estudiando. El Sistema Munsell es el más utilizado para describir el color. De acuerdo con estas tablas de colores se determina el color de la escoria de acero.

- **Descripción del Sistema Munsell.** Detalla todos los posibles colores en términos de tres coordenadas: matiz (Hue) que mide la composición cromática de la luz que alcanza el ojo; claridad (Value), el cual indica la luminosidad u oscuridad de un color con relación a una escala de gris neutro; y pureza (Chroma), que indica el grado de saturación del gris neutro por el color del espectro.

2.3.1.4 Equipo.

- Tablas de colores Munsell

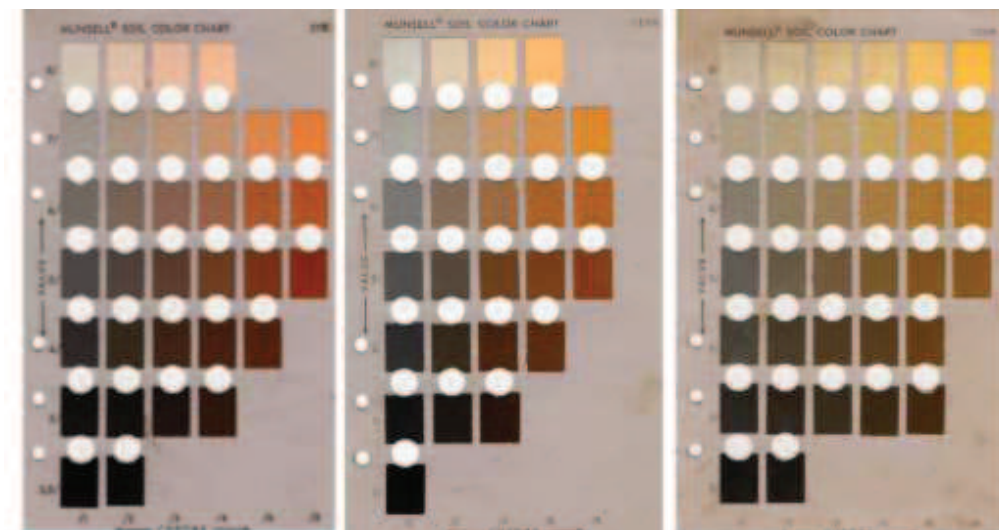


Figura 10. Tablas de colores Munsell.

Fuente: Sistema de colores Munsell. (2003). El color de los suelos.

2.3.1.5 Materiales.

- Muestra de escoria negra aproximadamente 50.00 gramos.



Figura 11. Muestra de escoria de acero.

2.3.1.6 Procedimiento.

Se procede a colocar la muestra de escoria en una superficie plana y blanca para evitar la difuminación y distorsión del color de la misma, y se la compara con las tablas de colores Munsell, haciendo énfasis en la tabla 10YR.

2.3.1.7 Resultados.

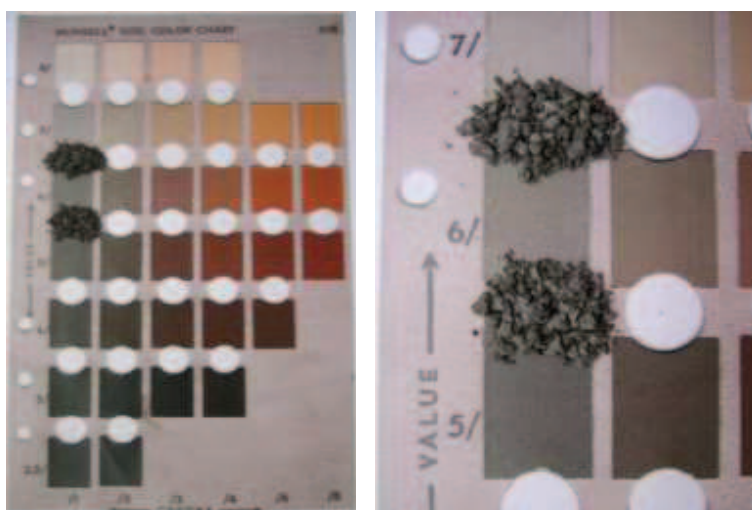


Figura 12. Definición del color de la escoria en las tablas Munsell.

Se determina que el color de la escoria negra es obscuro o negro a simple vista, a veces con brillo metálico; presenta pequeñas pigmentaciones de color rojo que indica el contenido de óxidos de hierro y manganeso, el amarillo indica óxidos de hierro hidratado. Entonces: la escoria en condiciones secas es 5YR/5/1; lo cual indica el nivel de matiz/ claridad/ pureza, tiene un matiz amarillo y rojo a un nivel de 5.0, tiene un nivel 5 de claridad y 1 de pureza o intensidad de color (los niveles fluctúan entre 0 y 10).

2.4 Características químicas.

Es importante enfatizar el estado químico de la escoria puesto que será un componente más del hormigón destinado a utilizarse en la construcción de pisos industriales, veredas, bordillos, cimentaciones, pisos de estacionamientos, etc., que al estar al servicio de las personas y en contacto con el ambiente debe sujetarse a la normativa permisible para preservar la salud pública y del ambiente; para ello se ha realizado el Test TCLP (Procedimiento de Lixiviación Característico de Toxicidad).

El procedimiento de lixiviación característica de toxicidad (TCLP) determina la movilidad de los contaminantes inorgánicos presentes en una muestra y si los filtrados generados dan lugar a clasificar el material como “peligroso”. El lixivante se determina basándose en la capacidad de neutralización ácida del material de la muestra. El lixivante seleccionado se añade a la muestra a una razón de líquido a sólidos de 20:1, y el contenedor de

la muestra se rota de punta a punta durante 18 horas. El compuesto resultante se filtra a través de un filtro de fibra de vidrio de 0,7 μm y se analiza para obtener los metales totales (Société Générale de Surveillance, 1995).

De este ensayo se obtuvo el siguiente reporte:

Cuadro 1. Test TCLP de la escoria de acero.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Cadmio	Cd	mg/l	0.02
Cromo	Cr	mg/l	0.5
Hierro total	Fe	mg/l	25
Mercurio	Hg	mg/l	0.01
Plomo	Pb	mg/l	0.5
Zinc	Zn	mg/l	10

Fuente: (Nicolalde, 2008). Adoquines con escoria de acero.

Estos valores deben estar acorde con los límites permisibles que toda descarga al sistema de alcantarillado deberá cumplir, al menos, con los valores establecidos en la Tabla 3.

Tabla 3. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Cadmio	Cd	mg/l	0.02
Cromo	Cr	mg/l	0.5
Hierro total	Fe	mg/l	25
Mercurio	Hg	mg/l	0.01
Plomo	Pb	mg/l	0.5
Zinc	Zn	mg/l	10

Fuente: (Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente, TULAS).

Realizando la comparación de la cantidad de elementos de la escoria con los límites permisibles por cada litro de agua que será evacuado al sistema de alcantarillado público se tiene que están por debajo de los límites, cumpliendo con la norma, considerando que el contenido de cadmio está en el límite con 0.02 mg/l se estima que la escoria como árido del hormigón se encapsule y disminuya las cantidades reportadas.

2.5 Características mineralógicas de la escoria de acero.

Para conocer las características mineralógicas se envió 1.00 Kg de escoria de acero un laboratorio Químico, en el cual se ha realizado el ensayo de difracción de rayos X.

2.5.1 Descripción del ensayo Difracción de Rayos X

Esta técnica consiste en hacer pasar un haz de rayos X a través de un cristal, parte de este haz se dispersa en varias direcciones a causa de los electrones asociados a los átomos e iones que se encuentran en el trayecto, pero el resto del haz puede dar lugar al fenómeno de difracción de rayos X, que tiene lugar si existe una disposición ordenada de átomos y se cumplen las condiciones que vienen dadas por la Ley de Bragg. El método de polvos se basa en la obtención del conjunto de todos los máximos de difracción que genera un material cristalino, lo que constituye en una huella de la estructura cristalina propia de cada fase cristalina (Jenkins y Snyder, 1996, pg 68).

De este ensayo se obtiene el siguiente reporte:

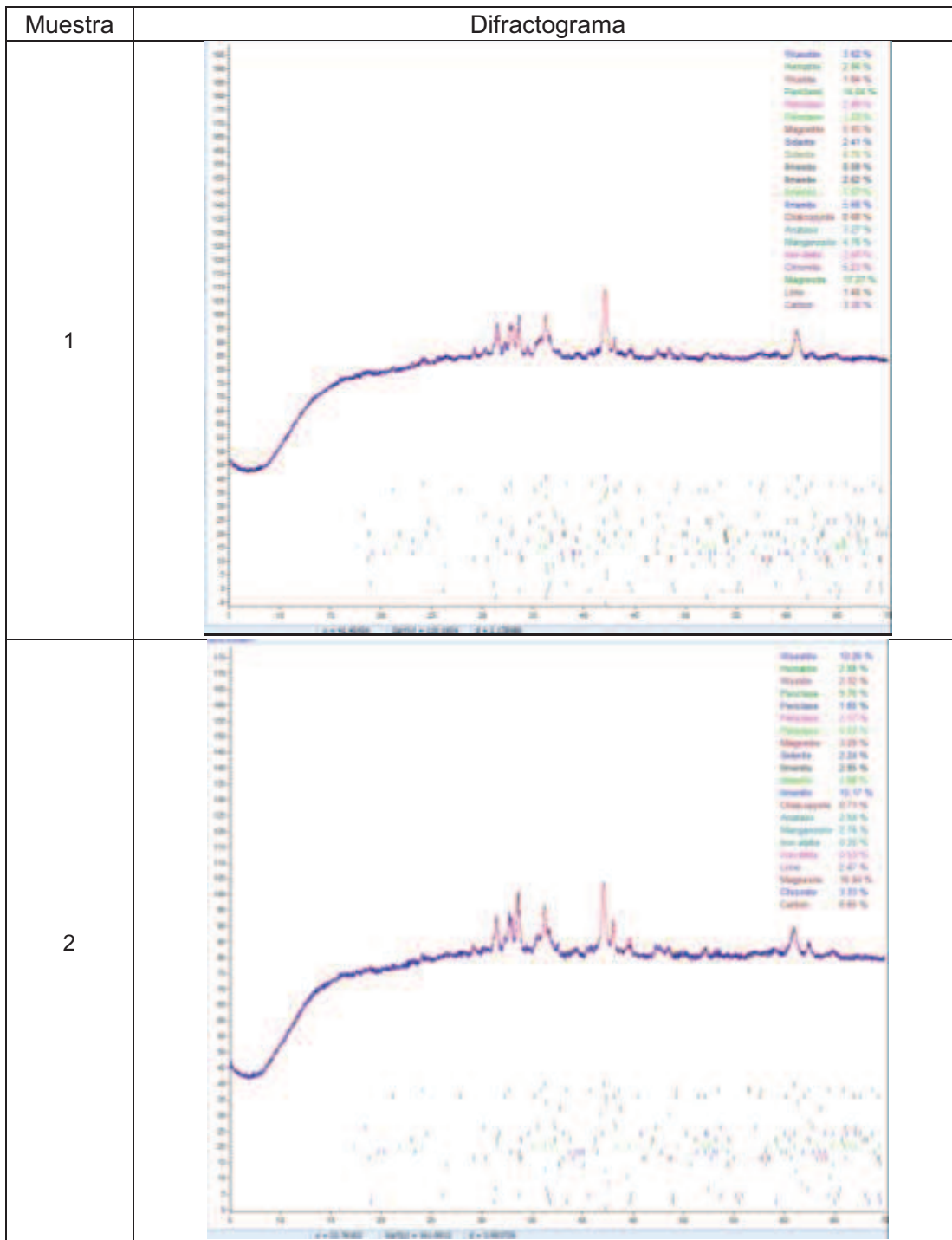


Figura 13. Difractogramas de muestras 1 y 2 ensayadas.

Fuente: Ensayo de Difracción de Rayos X de escorias de acero en INPC.

Composición mineralógica de las muestras:

Cuadro 2. Porcentajes de las aleaciones presentes en la escoria de acero.

Muestra 1			Muestra 2		
Aleación	Fórmula	Porcentaje	Aleación	Fórmula	Porcentaje
Ilmenita	FeTiO ₃	22.8	Ilmenita	FeTiO ₃	23.05
Periclasa	MgO	17.76	Periclasa	MgO	19.15
Magnesita	MgCO ₃	17.27	Magnesita	MgCO ₃	16.04
Siderita	FeCO ₃	7.11	Wuestita	FeO	10.26
Magnetita	Fe ₃ O ₄	5.93	Carbón	C	8.65
Cromita	FeCr ₂ O ₄	5.23	Cromita	FeCr ₂ O ₄	3.33
Manganosita	MnO	4.76	Magnetita	Fe ₃ O ₄	3.29
Wuestita	FeO	3.62	Manganosita	MnO	2.76
Carbón	C	3.3	Anatasa	TiO ₂	2.54
Anatasa	TiO ₂	3.27	Cal	CaO	2.47
Hematita	Fe ₂ O ₃	2.96	Wustita	FeO	2.32
Hierro	Fe	2.56	Siderita	FeCO ₃	2.24
Wustita	FeO	1.84	Hematita	Fe ₂ O ₃	2.08
Cal	CaO	1.48	Calcopirita	CuFeS ₂	< 1
Calcopirita	CuFeS ₂	< 1	Hierro	Fe	<1

Fuente: Ensayo de Difracción de Rayos X de escorias de acero en INPC.

Analizando los porcentajes de cada muestra se percibe que las aleaciones que predominan en la composición de la escoria son: ilmenita, periclasa, magnesita y siderita, también se observa una variación de porcentajes entre la muestra 1 y la muestra 2 de las aleaciones: wuestita, siderita y carbón; esto se debe a que la escoria es producto de la amplia

multiplicidad de chatarra ferrosa reciclada que se funde en los altos hornos de arco eléctrico, es decir, el acero reciclado no viene de una misma fuente.

Por otra parte la máquina utilizada para realizar el ensayo de difracción de rayos X está programada esquemáticamente con el formato de análisis de minerales, pero en el caso de la escoria, no se está tratando de minerales sino de aleaciones, la máquina las asocia como familias pero al ser sometidos a un rango de 1580° C a 1620° C de temperatura, todos los elementos que forman la escoria pierden su estructura ya que han superado su punto de fusión, se transforma en una masa sólida, conocida químicamente como aleaciones, por ello no presentan toxicidad, no son nocivas para la salud humana y el ambiente (V. Delgado, comunicación personal, 19 de diciembre de 2014).

Anteriores estudios de las escorias negras de acero como árido siderúrgico para la elaboración de hormigón manifiestan que su contenido de óxido de calcio (CaO) y óxido de magnesio (MgO), puede producir expansiones en el hormigón ya endurecido debido a las reacciones frecuentemente con el agua generando hidróxidos (Nicolalde, 2008, pg 56).

Sin embargo los porcentajes del CaO son bajos, mientras que el MgO presenta porcentajes considerables en las dos muestras, lo cual que se espera se encapsule al ser componente del hormigón hidráulico y disminuya su porcentaje ya que al hormigón hidráulico también se la adicionará un inhibidor de corrosión.

2.5.2 Granulometría de la escoria de acero. ASTM C 136.

La norma cubre la determinación de la distribución del tamaño de las partículas del agregado fino y grueso por tamizado.

2.5.2.1 Equipo.

- Balanza legible a 0.1 gramos.
- Serie de tamices para la granulometría del agregado fino, 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100.
- Tamizadora mecánica.
- Horno a 110+/-5°C.



Figura 14. Equipo para ensayo ASTM C 136.

2.5.2.2 Materiales.

El tamaño de la muestra para el ensayo de las mezclas de árido grueso y fino, debe ser el mismo que para el árido grueso, según la Tabla 4.

Tabla 4. Tamaño de la muestra para ensayo del árido grueso

Tamaño nominal máximo, Aberturas cuadradas, en mm (pulgadas).	Tamaño de la muestra del ensayo Mínimo (kg)
9,5	1
12,5	2
19,0	5
25,0	10
37,5	15
50	20
63	35
75	60
90	100
100	150
125	300

Fuente: (ASTM C 136, 2010)

- Muestra de agregado fino: 1 100,00 gramos de escoria de acero.



Figura 15. Muestra para ensayo ASTM C 136.

2.5.2.3 Procedimiento.

- Secar la muestra para mantener la masa constante a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Seleccionar los tamices con las aberturas convenientes para proporcionar la información necesaria para cubrir las especificaciones del material que se está ensayando. Ordenar los tamices en forma

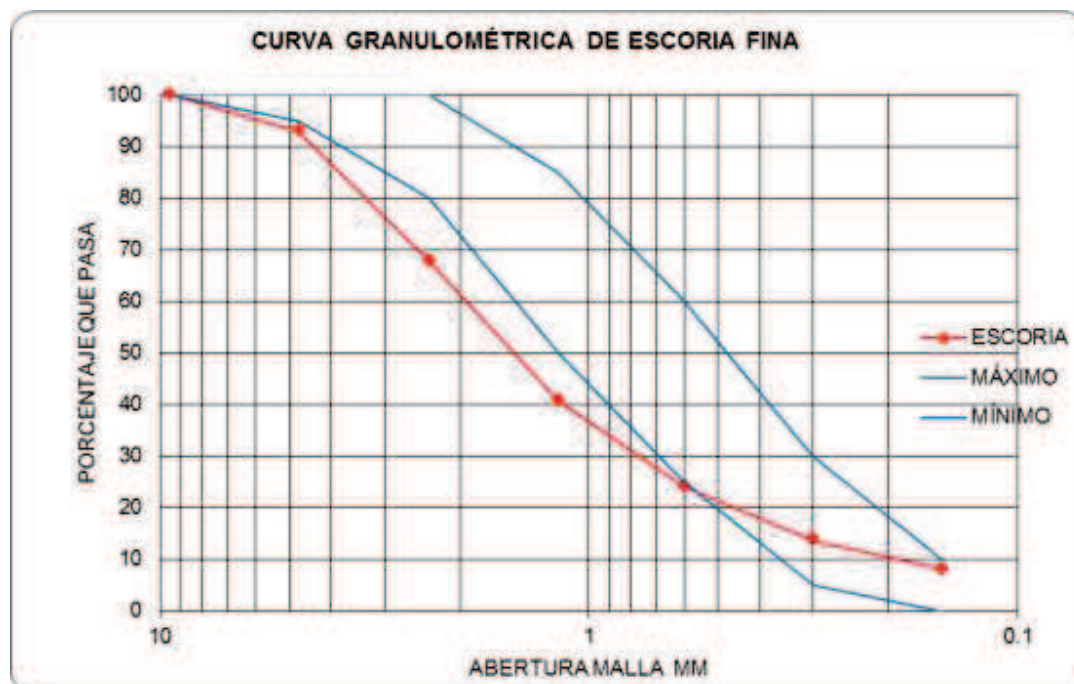
decreciente de acuerdo con el tamaño de las aberturas de arriba hacia abajo y colocar la muestra sobre el tamiz superior.

- Limitar la cantidad del material colocado en el tamiz para que todas las partículas tengan la oportunidad para alcanzar las aberturas del tamiz un número de veces durante la operación de tamizado.
- A menos que se use un tamizador mecánico no se debe forzar el paso de las partículas a través de las aberturas.
- Determinar las masas de cada incremento de tamaño en la balanza. La masa total del material después del tamizado debe ser similar a la masa original de la muestra colocada sobre los tamices. Si las cantidades difieren en más del 0.3%, respecto a la masa de la muestra seca original, los resultados no deben ser utilizados con fines de aceptación.

2.5.2.4 Resultados.

Cuadro 3. Ensayo ASTM C 136 de la escoria de acero.

MUESTRA No. 1: Escoria fina directa de la empresa siderúrgica.				
TAMICES	PESO RETENIDO (g)	RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO PASA TOTAL
3/8" (9.5 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
No. 4 (4.76 mm)	77.00	77.00	7.00	93.00
No. 8 (2.36 mm)	277.00	354.00	32.18	67.82
No. 16 (1.18 mm)	298.00	652.00	59.27	41.73
No. 30 (0.6 mm)	183.00	835.00	75.91	24.09
No. 50 (0.30 mm)	114.00	949.00	86.27	13.73
No. 100 (0.15 mm)	62.00	1 011.00	91.91	8.09
Pasa No 100	89.00	1 100.00		
PESO INICIAL DE LA MUESTRA (g):			1 100.00	
MÓDULO DE FINURA			3.5	



Este resultado es de la muestra de escoria directamente proveniente de la empresa siderúrgica, en el capítulo 3 se realizará la estabilización granulométrica para que la granulometría encaje en la faja granulométrica.

2.5.3 Peso específico y absorción de la escoria de acero. ASTM C 128.

Este método de ensayo se aplica para la determinación de la densidad promedio en una muestra de árido fino, la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del árido. Dependiendo del procedimiento utilizado, la densidad es expresada como: seca al horno (SH), saturada superficialmente seca (SSS) o como densidad aparente. De la misma manera, la densidad relativa (gravedad específica), una cantidad adimensional, es expresada como SH, SSS o como densidad relativa aparente (gravedad específica aparente). La densidad SH y la densidad relativa SH se determinan luego de secar el árido. La densidad SSS, densidad relativa SSS y la absorción se determinan luego de saturar el árido en agua por un periodo definido.

2.5.3.1 Equipo.

- Balanza, capacidad de carga 1 Kg o más.
- Picnómetro de 500 cm³ de capacidad.

- Molde y compactador para ensayo de humedad superficial.



Figura 16. Equipo para realizar el ensayo ASTM C 128.

2.5.3.2 Materiales.

- Muestra de agregado fino: 1 Kg de escoria de acero.



Figura 17. Muestra de escoria para realizar el ensayo ASTM 128.

2.5.3.3 Procedimiento.

Se sumerge en agua por $24 \text{ h} \pm 4 \text{ h}$, una muestra de árido previamente secada, hasta conseguir una masa constante, con el propósito de llenar con agua sus poros. Se retira la muestra del agua, se seca el agua superficial de las

partículas y se determina su masa. Luego, se coloca la muestra (o parte de esta) en un recipiente graduado y se determina el volumen de la muestra por el método gravimétrico o volumétrico; finalmente, la muestra se seca al horno y se determina nuevamente su masa. Utilizando los valores de masa obtenidos y mediante las fórmulas de este método de ensayo, es posible calcular la densidad, la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción.

2.5.3.4 Resultados.

Cuadro 4. Ensayo de peso específico y absorción de la escoria siderúrgica.

VARIABLES	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	CANTIDADES
A	PESO EN EL AIRE DE LA MUESTRA SECADA AL HORNO	(g)	489.40
V	VOLUMEN DE LA PROBETA	(cm ³)	500.00
W	PESO EN GRAMOS O VOLUMEN EN ml. DEL AGUA AÑADIDA	(cm ³)	356.30
$A/(V-W)$	GRAVEDAD ESPECÍFICA DE MASA	(g/cm ³)	3.41
$500/(V-W)$	GRAVEDAD ESPECÍFICA SATURADA SUPERFICIE SECA	(g/cm ³)	3.48
$A/((V-W)-(500-A))$	GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE	(g/cm ³)	3.68
$(500-A/A)*100$	ABSORCIÓN DE AGUA	(%)	2.17
OBSERVACIONES: Temperatura ensayo = 25°C.			

2.5.4 Densidad suelta y compactada de la escoria de acero. ASTM C 29.

Este método de ensayo cubre la determinación de la densidad volumétrica (peso unitario) del agregado en condición suelta o compactada. Este ensayo es aplicable a agregados que no excedan un tamaño nominal de 5 pulg. (125 mm).

2.5.4.1 Equipo.

- Balanza, con precisión del 0.1% o al menos 0.1 (0.05 Kg).
- Barra apisonadora redondeada, barra recta de acero, 5/8 pulg. (16 mm) de diámetro y aproximadamente 24 pulg. (600 mm) de largo, con uno o dos extremos redondeados o semiesféricos, cuyo diámetro sea de 5/8 pulg. (16 mm).
- Molde cilíndrico de metal, preferiblemente provisto por agarraderas, hermético en la parte superior y en su base, y suficientemente rígido.
- Cuchara de tamaño suficiente para llenar el molde con el agregado.



Figura 18. Equipo para ensayo ASTM C 29.

2.5.4.2 Materiales.

El tamaño de la muestra será aproximadamente 125% a 200% de la cantidad requerida para llenar el molde, y será llevada de manera tal que evite la segregación. Secar la muestra de agregado manteniendo constante la masa en un horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

- Muestra de escoria de acero: 30 000.00 gramos para la densidad suelta y 30 000.00 gramos para la densidad varillada.



Figura 19. Muestra para el ensayo ASTM C 29

2.5.4.3 Procedimiento.

- Llenar el molde a un tercio de su capacidad y nivelar la superficie con los dedos. Apisonar con la barra la capa de agregados con 25 golpes, distribuyéndolos sobre la superficie. Llenar a los dos tercios de la capacidad del molde, nivelar y apisonar de la misma forma como se describe anteriormente. Finalmente llenar el molde y apisonar como se menciona anteriormente. Nivelar la superficie del agregado con los dedos o con una regla, en este caso evitar que las partículas grandes del

agregado grueso equilibren los vacíos debajo de la superficie del borde superior del molde.

- Al apisonar la primera capa, no se deberá permitir que se golpee el fondo del molde. El apisonamiento de la segunda y la tercera capa deberán hacerse vigorosamente, pero evitando que la varilla penetre en las capas anteriores del agregado.
- Determinar la masa del molde con el contenido, y la masa del molde vacío. Anotar las lecturas aproximándolas a 0.1 lb. (0.05 Kg) más cercana.

2.5.4.4 Resultados.

Cuadro 5. Ensayo ASTM C 29 de la escoria de acero.

DENSIDAD SUELTA DE LA ESCORIA DE ACERO			
DESCRIPCIÓN	CANTIDADES		
	M1	M2	M3
Molde No.			
Peso del molde (g)	6 640.00	6 640.00	6 640.00
Peso molde + suelo (g)	35 315.00	35 487.00	35 355.00
Peso suelo (g)	28 675.00	28 847.00	28 715.00
Volumen (cm ³)	14 235.34	14 235.34	14 235.34
Densidad suelta (g/cm ³)	2.01	2.03	2.02
Media	2.02		

DENSIDAD COMPACTADA DE LA ESCORIA DE ACERO			
DESCRIPCIÓN	CANTIDADES		
	M1	M2	M3
Molde No.			
Peso del molde (g)	6 640.00	6 640.00	6 640.00
Peso molde + suelo (g)	37 345.00	37 629.00	37 445.00
Peso suelo (g)	30 705.00	30 989.00	30 805.00
Volumen (cm ³)	14 235.34	14 235.34	14 235.34
Densidad compactada (g/cm ³)	2.16	2.18	2.16
Media	2.17		

2.5.5 Contenido de humedad en el agregado por secado de la escoria de acero. ASTM C 566.

Este método de ensayo cubre la determinación del porcentaje de humedad evaporable de una muestra de agregados por secado, la humedad superficial y la humedad de los poros del agregado. Algunos agregados pueden contener agua que se combina químicamente con los minerales del agregado. El agua que no es evaporable no está incluida en el porcentaje determinado por el método de ensayo ASTM C 566.

2.5.5.1 Equipo.

- Balanza con escala precisa, confiable y con una sensibilidad de 0.1% de la carga de prueba en cualquier punto del rango de uso.
- Horno ventilado capaz de mantener alrededor de la muestra una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Recipiente refractario de capacidad suficiente para alojar a la muestra.
- Una cuchara o espátula metálica de tamaño adecuado.



Figura 20. Equipo para ensayo ASTM C 566.

2.5.5.2 Materiales.

Se debe asegurar que la muestra de los agregados represente el contenido de humedad de la fuente a ser ensayada y teniendo una masa no menor a las listadas en la Tabla 5. Proteger a la muestra de las pérdidas de humedad antes de determinar la masa.

Tabla 5. Tamaño de la muestra de agregados.

Tamaño máximo nominal del agregado (A)		Peso mínimo de la muestra (B)
Normal (mm)	Alternativo (pulgadas)	(kg)
4.75	(No 4)	0.5
9.5	(3/8")	1.5
12.5	(1/2")	2
19.0	(3/4")	3
25.0	(1")	4
37.5	(1 1/2")	6
50.0	(2")	8
63.0	(2 1/2")	10
75.0	(3")	13
90.0	(3 1/2")	16
100.0	(4")	25
150.0	(6")	50

(A) Basado en tamices de malla cuadrada.

(B) Para determinar el peso mínimo de muestras de agregados livianos, multiplíquese el valor señalado, por la disminución aproximada de peso unitario seco en kg/m^3 y divídase por 1600.

Fuente: (ASTM C 566, 2004)

- Muestra de escoria de acero: 220 gramos.



Figura 21. Muestra para ensayo ASTM C 566.

2.5.5.3 Procedimiento.

- Determinar la masa de la muestra aproximando su lectura a 0.1% más cercano.

- Secar la muestra colocada en el recipiente utilizando la fuente de calor seleccionada, evitando la pérdida de las partículas.
- Determinar la masa de la muestra seca aproximando su lectura al 0.1% más cercano después que se ha enfriado la muestra lo suficiente para no dañar la balanza.

2.5.5.4 Resultados.

Cuadro 4. Ensayo ASTM C 566 de la escoria de acero.

DESCRIPCIÓN	ESCORIA DE ACERO	
	MUESTRA 1	MUESTRA 2
RECIPIENTE	Z-11	Z-12
PESO DEL RECIPIENTE (g)	122.10	124.00
PESO DEL RECIPIENTE + MUESTRA HUMEDA (g)	338.50	339.15
PESO DEL RECIPIENTE + MUESTRA SECA (g)	338.20	338.80
PESO DEL AGUA (g)	0.30	0.35
PESO SECO (g)	216.10	214.80
% AGUA	0.14	0.16
% AGUA PROMEDIO	0.15	
OBSERVACIONES: Temperatura del horno 110°C.		

A continuación se presenta un resumen de la caracterización de la escoria de acero directamente extraída de los stocks de la empresa siderúrgica.

Cuadro 6. Resumen de caracterización escoria de acero directa.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	ESCORIA DIRECTA
GRAVEDAD ESPECÍFICA DE MASA	Kg/m ³	3 405.71
GRAVEDAD ESPECÍFICA SATURADA SUPERFICIE SECA	Kg/m ³	3 479.47
GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE	Kg/m ³	3 676.93
ABSORCIÓN DE AGUA	%	2.17
MÓDULO DE FINURA	-	3.50
CONTENIDO DE HUMEDAD	%	0.15
DENSIDAD SUELTA	Kg/m ³	2 019.32
DENSIDAD COMPACTADA	Kg/m ³	2 165.95

Como se puede ver en el Cuadro 6, la escoria de acero directa presenta un módulo de finura de 3.5 el cual no cumple con las disposiciones de la norma INEN 872, ya que el módulo de finura no debe ser menor de 2.3 ni mayor de 3.1; sin embargo en el capítulo 3 se realiza la estabilización granulométrica de la escoria de acero y por ende se modificará en módulo de finura.

CAPÍTULO 3

ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.

3.1 Caracterización del cemento portland.

El material aglutinante que se utilizará en la producción de hormigón hidráulico con agregados de origen natural (arena y grava) y hormigón hidráulico con escorias de acero es el cemento puzolánico tipo IP, de este se hicieron ensayos de densidad, consistencia normal y tiempos de fraguado; a continuación se expone cada uno de ellos.

3.1.1 Determinación de la densidad del cemento. ASTM C 188.

Esta norma establece el método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico, este método se relaciona con el diseño y control de mezclas de hormigón.

3.1.1.1 Equipo.

- Balanza con una precisión de 0.05 g.

- Recipiente para baño de agua, capaz de mantener una temperatura constante, con una variación máxima de 0.20°C.
- Picnómetro de cristal, de excelente calidad, transparente y libre de arrugas o estrías, químicamente resistente, debe tener una pequeña histéresis térmica; la separación entre la marca de mayor graduación y el punto más bajo del esmerilado del tapón de cristal, debe ser por lo menos de 10 cm.

En el numeral 4.2.5 de la norma INEN156 (Determinación de la densidad del cemento hidráulico), se especifica que se permite el uso de equipos o métodos alternativos para determinar la densidad del cemento, a condición de que el mismo operador pueda obtener resultados dentro de $\pm 0.03 \text{ g/cm}^3$ de los resultados obtenidos utilizando el método del frasco. En virtud de este numeral el ensayo se realiza con un picnómetro de 100 ml.



Figura 22. Equipo para realizar el ensayo ASTM C 188.

3.1.1.2 Materiales.

- Agua destilada: 100 ml.
- Cemento: 50 gr.



Figura 23. Materiales para ensayo ASTM C 188.

3.1.1.3 Procedimiento.

- Llenar el frasco con agua hasta un punto en la parte baja del cuello entre las marcas 0 cm³ y 1 cm³. Si es necesario, se debe secar el interior del frasco sobre el nivel del líquido después de llenarlo. Registrar la primera lectura después de sumergir el frasco en un baño de agua a una temperatura constante por períodos de tiempo suficientes, evitando variaciones de temperatura en el frasco mayores a 0.2°C entre las lecturas inicial y final.
- El cemento, previamente pesado se introduce en pequeños incrementos a la misma temperatura que el líquido, evitando salpicaduras, observar que el cemento no se adhiera al interior del frasco sobre el líquido. Un aparato vibrador puede ser utilizado para acelerar la introducción del cemento dentro del frasco y para prevenir que el cemento se atasque en el cuello.

- Después de que todo el cemento ha sido introducido, colocar el tapón en el frasco, rodarlo en posición inclinada, o suavemente girarlo en círculos horizontales, de manera de liberar el aire hasta que ya no suban burbujas a la superficie del líquido. Si ha sido añadida una cantidad adecuada de cemento, el nivel del líquido estará en su posición final en algún punto de las graduaciones en la parte superior del cuello. Registrar la lectura final después de que el frasco ha sido sumergido en el baño de agua, teniendo en cuenta la variación permitida de la temperatura descrita al inicio del procedimiento.

3.1.1.4 Resultados.

Cuadro 7. Resultados de la densidad del cemento.

DENSIDAD DEL CEMENTO			
VARIABLES	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	VALOR
b	Calibración del picnómetro	cm ³	152.30
c	Peso del cemento secado al horno	gr	50.00
d	Peso del picnómetro lleno con cemento y agua a 25°C ± 0.20°C	gr	186.42
$\rho = \frac{c}{b + c - d} = 3.14 \text{ gr/cm}^3$			

3.1.2 Determinación de la consistencia normal del cemento hidráulico.

Método Vicat. ASTM C 187.

Esta norma establece el procedimiento para determinar la consistencia normal de una pasta de cemento hidráulico y se aplica a los cementos hidráulicos empleados en la fabricación de morteros y hormigones.

3.1.2.1 Equipo.

- Balanza con precisión y desviación a una carga total de 1000 g.
- Probetas graduadas de 200 cm³ ó 250 cm³ de capacidad.
- Aparato Vicat con los requisitos que se muestran en la Tabla 6.
- Anillo de material no corrosivo, no absorbente, con un diámetro interior de 70 mm en la base, 60 mm en la parte superior y una altura de 40 mm.
- Espátula plana con una hoja de acero con un filo recto endurecido de 100 a 150 mm de longitud.

Tabla 6. Requisitos para el aparato Vicat.

Masa de la varilla desmontable	300 g ± 0,5 g
Diámetro del extremo de penetración de la varilla	10 mm ± 0,05 mm
Diámetro de la aguja	1 mm ± 0,05 mm
Diámetro interior del anillo en la base	70 mm ± 3 mm
Diámetro interior del anillo en la parte superior	60 mm ± 3 mm
Altura del anillo	40 mm ± 1 mm
Escala graduada	La escala graduada, en comparación con una escala normalizada que tenga una precisión de 0,1 mm en todos los puntos, no mostrará una desviación mayor que 0,25 mm en cualquier punto.

Fuente: (INEN 157, 2009)

- Equipo para el mezclado mecánico de la pasta:
 - Mezcladora, dispositivo movido eléctricamente, debe tener mínimo 2 velocidades controladas, la primera velocidad debe hacer girar a la paleta a una velocidad de $140 \text{ rpm} \pm 5 \text{ rpm}$, la segunda velocidad a una velocidad de $285 \text{ rpm} \pm 10 \text{ rpm}$.
 - Paleta de acero inoxidable, debe ser removible.
 - Tazón de mezclado, debe ser removible, de capacidad nominal de 4.73 litros.



Figura 24. Equipo para ensayo ASTM C 187.

3.1.2.2 Materiales.

- Cemento: 650 gramos.
- Agua de mezclado.



Figura 25. Materiales para ensayo ASTM C 187.

3.1.2.3 Procedimiento.

- Antes de realizar el ensayo, se debe tener en cuenta que la temperatura del aire cerca de la mesa de mezclado, del cemento seco, de los moldes y las bases deben mantenerse entre 20°C y 27.5°C ; la temperatura del agua de mezclado no debe variar de $23^{\circ}\text{C} \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ y la humedad relativa del laboratorio no debe ser menor que 50%.
- Colocar la paleta y el tazón secos en la mezcladora, en posición de mezclado.
- Colocar toda el agua de mezclado en el tazón.
- Añadir el cemento al agua y dejarlo 30 segundos para que absorba el agua.
- Arrancar la mezcladora a velocidad baja ($140 \text{ rpm} \pm 5 \text{ rpm}$) y mezclar durante 30 segundos.


- Detener la mezcladora por 15 segundos, durante este tiempo empujar hacia abajo dentro de la mezcla, toda la pasta que se haya adherido a los lados del tazón.
- Arrancar la mezcladora a velocidad media ($285 \text{ rpm} \pm 10 \text{ rpm}$) y mezclar por 60 segundos.
- Con las manos enguantadas, rápidamente amasar la pasta de cemento, formar una bola, la cual se lanza seis veces de una mano a otra, separadas una distancia libre de alrededor de 150 mm, de manera de producir una masa aproximadamente esférica para que pueda ser fácilmente insertada en el anillo de Vicat con una cantidad mínima de manipulación adicional. Insertar la masa, presionándola con la palma de una mano por el extremo más ancho del anillo cónico, que es sostenido con la otra mano, llenar completamente el anillo con la pasta, retirar el exceso de pasta del lado más ancho con un solo movimiento de la palma de la mano, colocar el anillo por su extremo más ancho sobre la placa de base, y cortar el exceso de pasta que sobresale del extremo menor, en la parte superior del anillo, con un solo golpe oblicuo de una espátula sostenida ligeramente levantada sobre el borde del anillo y alisar la superficie con unos pocos toques ligeros del extremo de la espátula, si es necesario. Durante estas operaciones de cortado y alisado, tener cuidado de no comprimir la pasta.

- Determinación de la Consistencia. Centrar la pasta confinada en el anillo sobre la placa, bajo la varilla, poner el penetrador en contacto con la superficie de la pasta y ajustar el tornillo, luego ubicar el indicador móvil en la marca cero de la parte superior de la escala, o tomar una lectura inicial, soltar la varilla inmediatamente aflojando el tornillo. Todas las operaciones después de completar el mezclado y hasta soltar la varilla, no deben exceder de 30 segundos. La pasta está en su consistencia normal cuando la varilla penetra $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ bajo la superficie original de la pasta en 30 segundos después de haber sido soltada.
- Realizar mezclas de prueba variando los porcentajes de agua hasta obtener la consistencia normal. Hacer cada prueba con cemento fresco.

3.1.2.4 Resultados.

Cuadro 8. Determinación de la consistencia normal del cemento.

DETERMINACIÓN DE LA CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO POR EL MÉTODO VICAT		
Temperatura y humedad relativa del laboratorio.		
Temperatura:	20.80	°C
Humedad relativa:	86.00	%
Datos de los materiales.		
Temperatura del agua de mezclado:	23.50	°C
Masa del material ensayado:	840.00	gr.
Cantidad de agua requerida para la consistencia normal con una aproximación de 0.5 % respecto de la masa del cemento seco.		
Cantidad de agua =	190.00	ml.

CONTINÚA 

Cálculos.	
$C(\%) = \frac{m_a}{m_c} * 100$	
Donde:	
C = consistencia normal, en %.	
m _a = masa del agua, en g.	
m _c = masa del cemento, en g.	
$C = \frac{m_a}{m_c} * 100 = \frac{190.00 \text{ g}}{650.00 \text{ g}} * 100 = 29.23\%$	
h) Observaciones o detalles extras:	
	Ninguna.

3.1.3 Determinación del tiempo de fraguado del cemento hidráulico.

Método Vicat. ASTM C 191.

Esta norma establece el método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico por medio de la aguja de Vicat. El ensayo se lo realiza por el método A (el método manual). El tiempo de fraguado medido por este método no necesariamente proporciona los mismos resultados que el tiempo de fraguado de la pasta de cemento hidráulico medido por otros métodos, o el tiempo de fraguado del mortero u hormigón.

3.1.3.1 Equipo

- Equipo de Vicat de escala graduada de 0.1 mm de exactitud, altura del anillo de 40±1 mm, diámetro de la aguja de 1±0.05 mm.
- Anillos cónicos con una altura de 40±1 mm, un diámetro de base interior de 70±3 mm, y un diámetro interior superior de 60±3 mm.

- Balanzas y masas para pesar de 2000 g con una aproximación de 0.02%.
- Vasos graduados de 250 ml de capacidad, variación de ± 2 ml.
- Placas planas no absorbentes (100 ± 5 mm).
- Espátula plana de 100 a 150 mm de longitud con bordes rectos, sujeta a un mango de 150 mm de lado.
- Mezcladora, paleta y tazón mezclador.



Figura 26. Equipo para ensayo ASTM C191.

3.1.3.2 Materiales.

- Agua de mezcla, el agua potable es satisfactoria para los ensayos de rutina.
- Muestra de cemento, 650 g.

3.1.3.3 Procedimiento.

- Antes de realizar el ensayo, se debe realizar el siguiente acondicionamiento: mantener la temperatura del aire en la cercanía de la mesa de mezcla, el cemento seco, los moldes y los platos base a $23.0^{\circ}\text{C} \pm 3.0^{\circ}\text{C}$; la temperatura del agua de mezcla a $23.0^{\circ}\text{C} \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ y la humedad relativa del cuarto de mezcla no debe ser inferior de 50%.
- Preparar una pasta de cemento con 650 g. de cemento con el porcentaje de agua de mezcla requerido para consistencia normal; con las manos enguantadas, rápidamente se forma una bola y láncela 6 veces de una mano a la otra, manteniendo las manos separadas aproximadamente 150 mm. Presionar la bola, con la palma de la mano, dentro del extremo más ancho del anillo cónico, sostenido con la otra mano, llenando completamente el anillo con la pasta. Retirar el exceso del lado más ancho con un solo movimiento de la palma de la mano. Colocar el anillo con su extremo más ancho sobre la placa no absorbente y corte el exceso de pasta en el extremo superior con un solo golpe oblicuo de una espátula sostenida ligeramente levantada sobre el borde del anillo. Si es necesario alisar la superficie del espécimen, con una o dos ligeras pasadas del extremo de la espátula. Durante la operación de cortado y alisado, tener cuidado de no comprimir la pasta. Inmediatamente después de moldeado, colocar el espécimen de ensayo en el gabinete húmedo o en la cámara de curado y dejarlo permanecer allí excepto

cuando se hagan las mediciones de penetración. La muestra debe permanecer en el molde cónico, sostenida por la placa no absorbente durante el período de ensayo.


- Determinación del tiempo de fraguado. Dejar que el espécimen para tiempo de fraguado, descanse en el gabinete húmedo o en la cámara de curado durante 30 minutos después del moldeo sin ser perturbado. Determinar la penetración de la aguja de 1 mm en este momento y cada 15 minutos de allí en adelante, hasta que se obtenga una penetración de 25 mm o menos. Para realizar el ensayo de penetración, bajar la aguja de la varilla hasta que tope la superficie de la pasta de cemento. Ajustar el tornillo de presión y encerar el indicador en el extremo superior de la escala, o tomar una lectura inicial. Soltar la varilla aflojando rápidamente el tornillo de presión E y permitir a la aguja descender por 30 segundos; luego tomar la lectura para determinar la penetración. Realizar cada ensayo de penetración por lo menos a 5 mm de distancia de cualquier penetración previa y por lo menos a 10 mm de distancia de la cara interior del molde. Registrar los resultados de todos los ensayos de penetración y, por interpolación, determinar el tiempo en que se obtiene una penetración de 25 mm. El tiempo transcurrido entre el contacto inicial del cemento y el agua y cuando la penetración es de 25 mm se conoce como tiempo de fraguado Vicat o tiempo de fraguado inicial Vicat.

- Determinar como el tiempo de fraguado final Vicat, a la primera medición de la penetración que no marque en la superficie del espécimen una impresión circular completa. Verificar el fraguado final con la realización de dos mediciones de penetración adicionales en áreas diferentes de la superficie del espécimen. Obtener las mediciones de verificación dentro de 90 segundos de la primera lectura de tiempo de fraguado final. El lapso entre el contacto inicial del cemento con el agua y la última determinación arriba indicada se conoce como el tiempo de fraguado final Vicat.

3.1.3.4 Resultados.

Cuadro 9. Tiempos de fraguado del cemento.

DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE FRAGUADO DEL CEMENTO POR EL MÉTODO DE VICAT	
Descripción de variables:	
T_1	= Tiempo de contacto inicial entre el agua y cemento.
T_2	= Tiempo de penetración de la aguja (hasta que penetre 25 mm).
T_3	= Tiempo hasta cuando la aguja no deja huella visible en la pasta.
T_i	= Tiempo inicial de fraguado: $T_i = T_2 - T_1$
T_f	= Tiempo de fraguado final: $T_f = T_3 - T_1$
Datos de acondicionamiento:	
Temperatura del laboratorio = 21.6 °C	
Temperatura del agua de mezcla = 24.20 °C	
Humedad relativa =	85 %

CONTINÚA 

Muestras	Tiempo T ₁	Tiempo T ₂	Tiempo T ₃	Tiempo Ti	Tiempo Tf
	Hora	Hora	Hora	Horas	Horas
Muestra 1	9:47	12:24	15:32	2:37	5:45
Muestra 2	10:05	12:50	15:50	2:45	5:45
Muestra 3	10:15	13:08	16:15	2:53	6:00
Promedio	-	-	-	2:45	5:50
				Ti= 165 min	Tf= 350 min
Observaciones:	Las condiciones de temperatura y humedad durante el fraguado están dentro de los rangos especificados en la norma.				

3.2 Características de los agregados naturales.

En esta sección se determina las características de los agregados de origen natural (arena y grava) como son: granulometría, peso específico y absorción, densidad varillada y suelta, y contenido de humedad. También se realiza la estabilidad granulométrica del árido siderúrgico, ya que debe ajustarse a los requisitos de gradación para áridos finos, destinados a la producción de hormigón dosificado usando el método ACI 211.1-91.

La descripción de los ensayos, equipo, materiales y procedimiento de los ensayos anteriormente mencionados, se puntualizó en el capítulo 2, a excepción del ensayo de desgaste y abrasión del árido grueso mediante el uso de la Máquina de los ángeles, que se describe en este capítulo; por esta razón únicamente se expondrá los resultados de los diferentes ensayos tanto de los áridos naturales (arena y grava) y el árido siderúrgico, con su respectiva observación. Cabe mencionar que primero se presenta los resultados de los

áridos provenientes directamente del stock de la cantera y consecuentemente las estabilidades granulométricas necesarias que se han hecho para cumplir las normas vigentes.

Los agregados naturales son procedentes de la rivera del río Pita, sector de trituración El Inga, situada en la hacienda Barrioteta (NARANJO-LOPEZ CONSTRUCTORES).

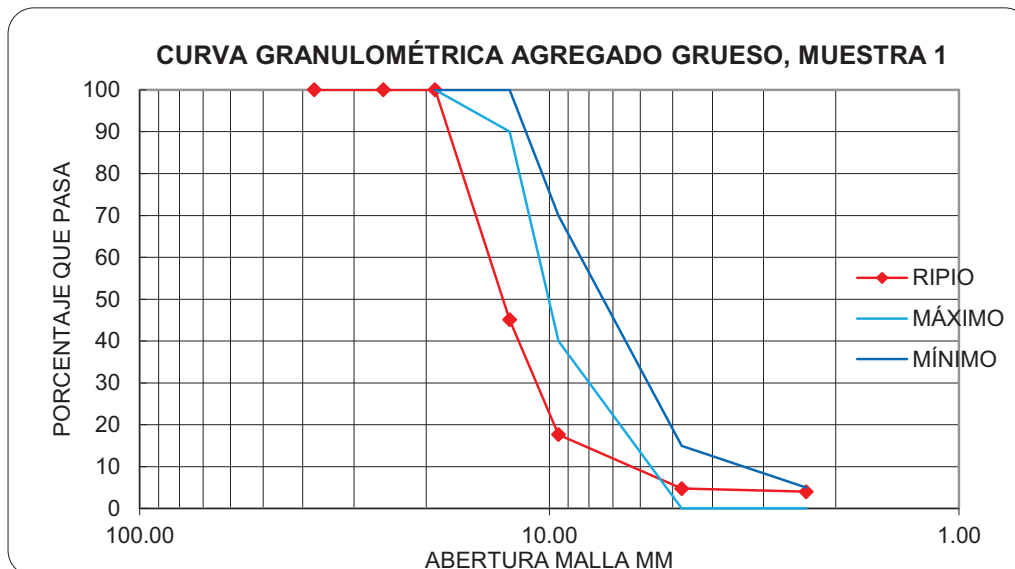
3.2.1 Análisis granulométrico por tamizado. ASTM C 136.

3.2.1.1 Granulometría del agregado grueso.

El Cuadro 10 y 11 indican los resultados de granulometría del agregado grueso extraído directamente de la cantera.

Cuadro 10. Granulometría agregado grueso, muestra 1.

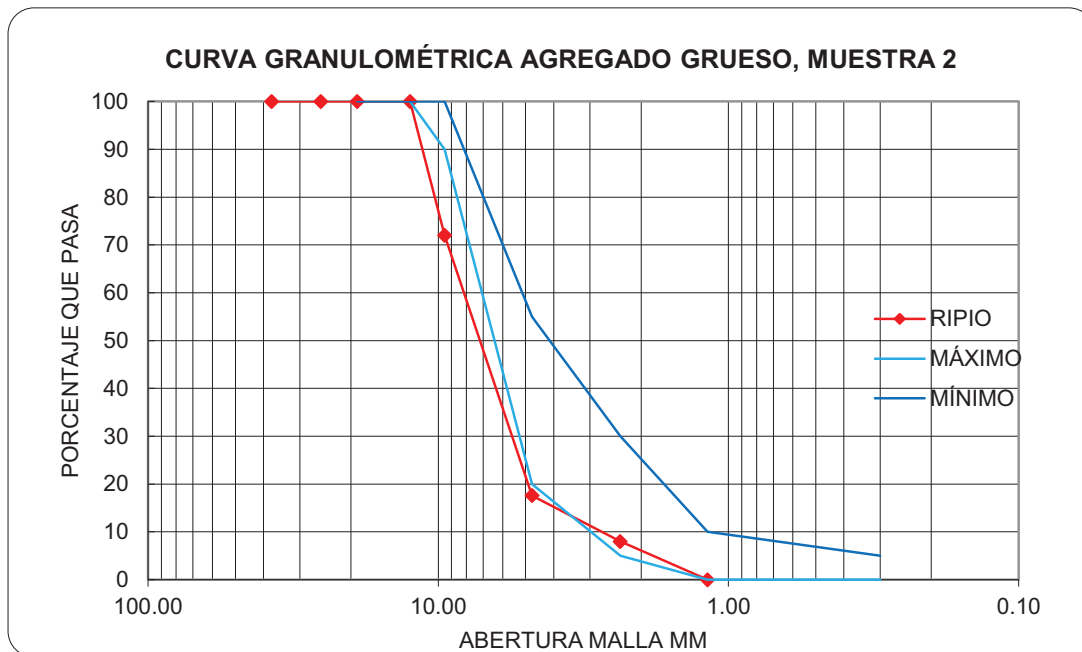
MUESTRA No.1: Agregado grueso directo de la cantera.				
TAMICES	PESO RETENIDO (g)	RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO PASA
3" (76.1 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
2" (51.8 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2" (38.1 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
1" (25.4 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4" (19.0 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2" (12.5mm)	4 950.00	4 950.00	54.91	45.09
3/8" (9.51 mm)	2 474.00	7 424.00	82.35	17.65
No. 4 (4.76 mm)	1 161.00	8 585.00	95.23	4.77
No. 8 (2.36 mm)	67.00	8 652.00	95.97	4.03
Pasa No. 8	363.00	9 015.00		
PESO INICIAL DE LA MUESTRA (g):			9 015.00	
TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL:			0.5 pulg	



El TM (tamaño máximo) de la muestra 1 es $\frac{3}{4}$ de pulgada, la curva granulométrica que genera no cumple con los requisitos de gradación de áridos gruesos para el hormigón de cemento hidráulico, estipulado en la NEVI-12 (Norma Ecuatoriana Vial).

Cuadro 11. Granulometría agregado grueso, muestra 2.

MUESTRA No 2: Agregado grueso directo de la cantera				
TAMICES	PESO RETENIDO (g)	RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO PASA
3" (76.1 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
2" (51.8mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2" (38.1 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
1" (25.4 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4" (19.0 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2" (12.5 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8" (9.51 mm)	1 611.00	1 611.00	27.96	72.04
No. 4 (4.76 mm)	3 136.00	4 747.00	82.40	17.60
No. 8 (2.36 mm)	554.00	5 301.00	92.02	7.98
Pasa No. 8	460.00	5 761.00		
PESO INICIAL DE LA MUESTRA (g):			5 761.00	
TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL:			3/8 pulg	



El TM de la muestra 2 es 1/2 pulgada, la curva granulométrica que genera tampoco cumple con los requisitos de gradación para áridos gruesos del NEVI-12.

Debido a que las dos muestras de agregado grueso no satisfacen los requisitos de gradación, se realiza una estabilidad u optimización granulométrica.

3.2.1.2 Estabilización granulométrica del agregado grueso.

(Rivera, 2013) En nuestro medio es muy común que ni la arena ni la grava que se dispone para elaborar el concreto cumplan con la recomendación granulométrica. Sin embargo, se puede hacer una estabilización granulométrica, que además de obtener adecuadas manejabilidades, sin

segregación de los granos, con una óptima graduación posible, proporcione resistencias a la compresión.

Para estos efectos se utilizó el método gráfico de la Road Note Laboratory.

El método consiste en una serie de pasos a continuación puntualizados.

- Se dibuja un cuadro de 10 divisiones en ordenadas y 10 divisiones en abscisas, tal como se aprecia en la Figura 27.
- Se enumeran los ejes de las ordenadas de abajo hacia arriba de 0 a 100; en los ejes de las abscisas, el superior se enumera de 0 a 100 de izquierda a derecha y el inferior de 0 a 100 de derecha a izquierda, de este modo cualquier valor de arriba sumado al correspondiente valor de abajo da 100.
- Se escoge el eje superior como eje de porcentajes de agregado de menor TM y el inferior como eje de porcentajes de agregado de mayor TM.
- Sobre el eje izquierdo de las ordenadas se coloca la granulometría del agregado de menor TM y sobre el eje derecho de las ordenadas se coloca la granulometría del agregado de mayor TM.
- Se unen por medio de líneas rectas los puntos correspondientes a cada tamiz en las dos granulometrías. Se tienen entonces líneas inclinadas que representan los posibles porcentajes de mezcla de agregados que pueden pasar por cada uno de los tamices.

- Sobre las líneas inclinadas se colocan los puntos correspondientes a la especificación elegida.
- Se traza un eje vertical que separe el conjunto de puntos hallados en igual cantidad en la parte izquierda como en la parte derecha. A este eje le corresponde un porcentaje de agregado de mayor TM y otro porcentaje de menor TM, estos porcentajes representan la mezcla óptima (Sánchez, 2005).

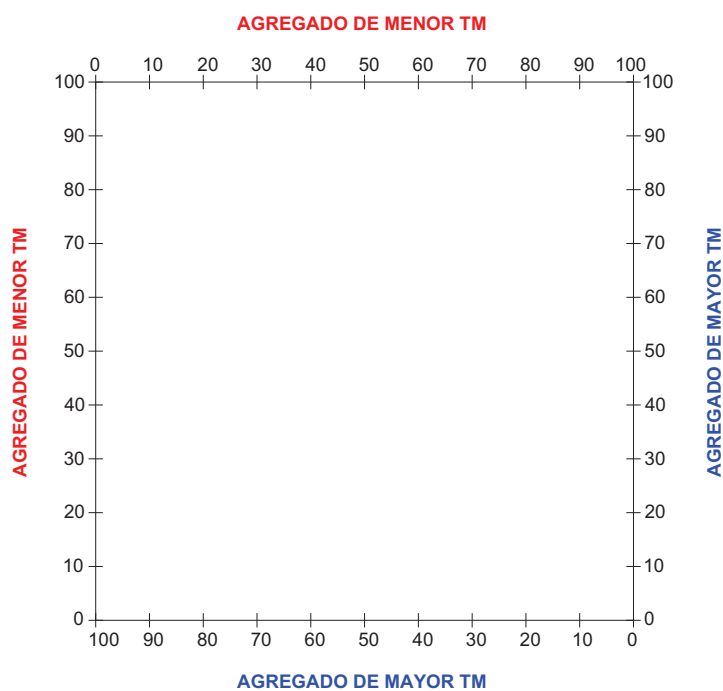


Figura 27. Método gráfico de la Road Note Laboratory.

Al realizar la estabilidad granulométrica, se distingue dos combinaciones: la primera con 20% de árido de $TM = 3/4''$ y 80% de árido de $TM = 1/2''$ y la segunda queda definida con 30% de árido de $TM = 3/4''$ y 70% de árido de $TM =$

1/2". En la Figura 28 y 29 se presenta las estabilidades obtenidas, se las puso en práctica realizando el ensayo normalizado para el análisis granulométrico de agregado grueso (ASTM C 136) y los resultados se muestran en los Cuadros 12 y 13, respectivamente.

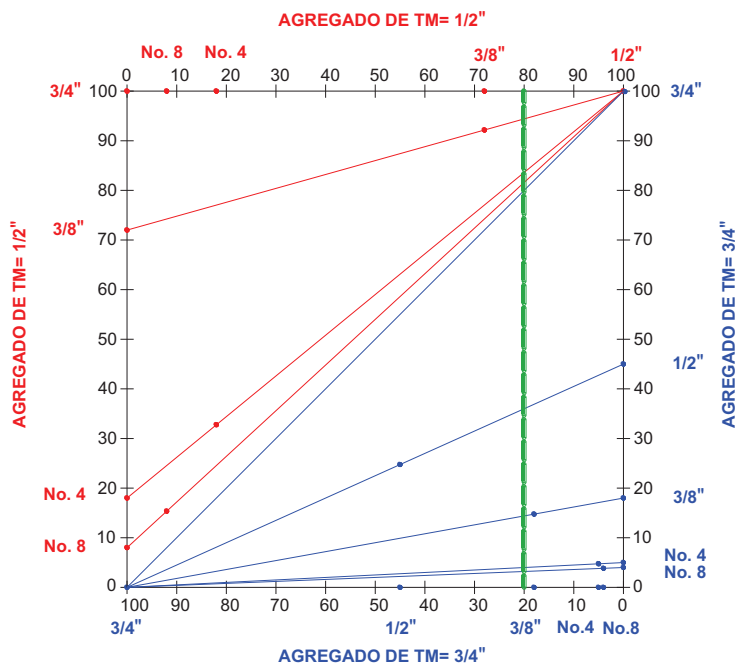


Figura 28. Primera estabilidad granulométrica.

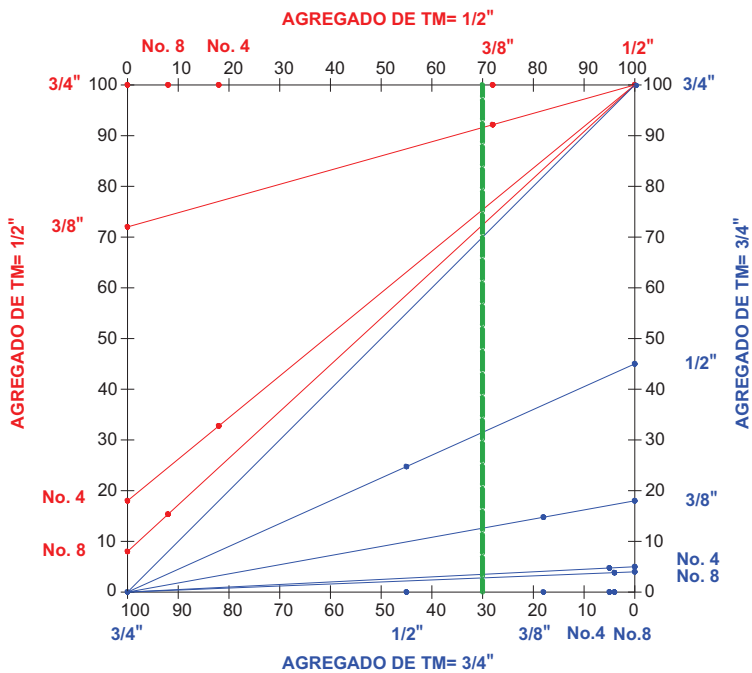
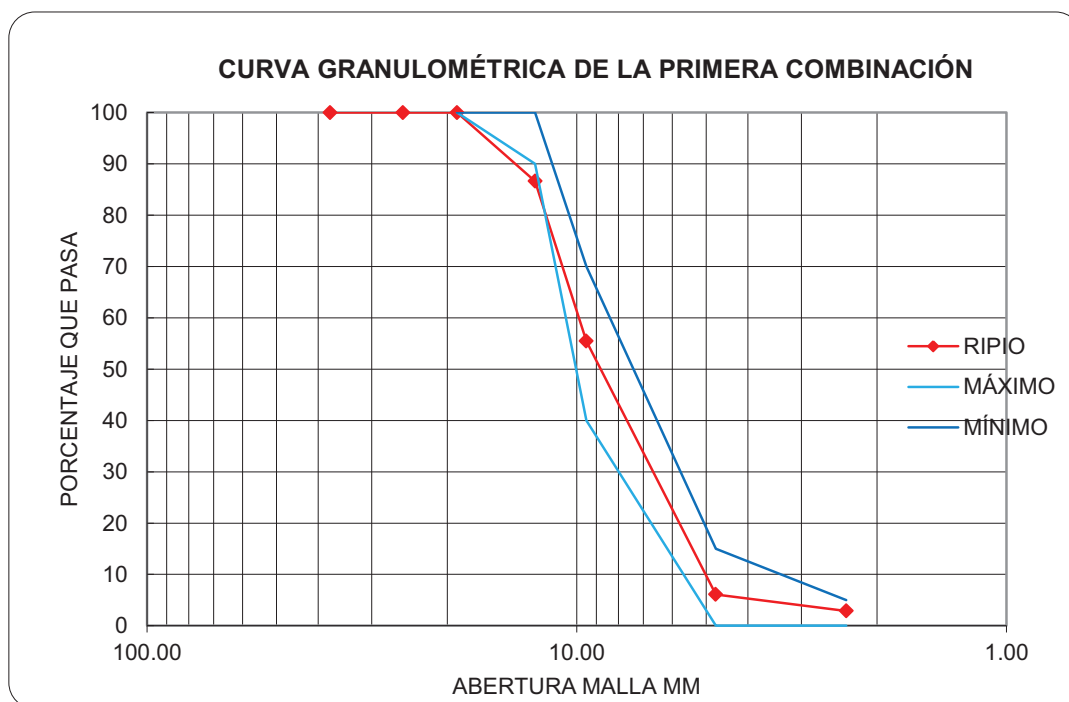


Figura 29. Segunda estabilidad granulométrica.

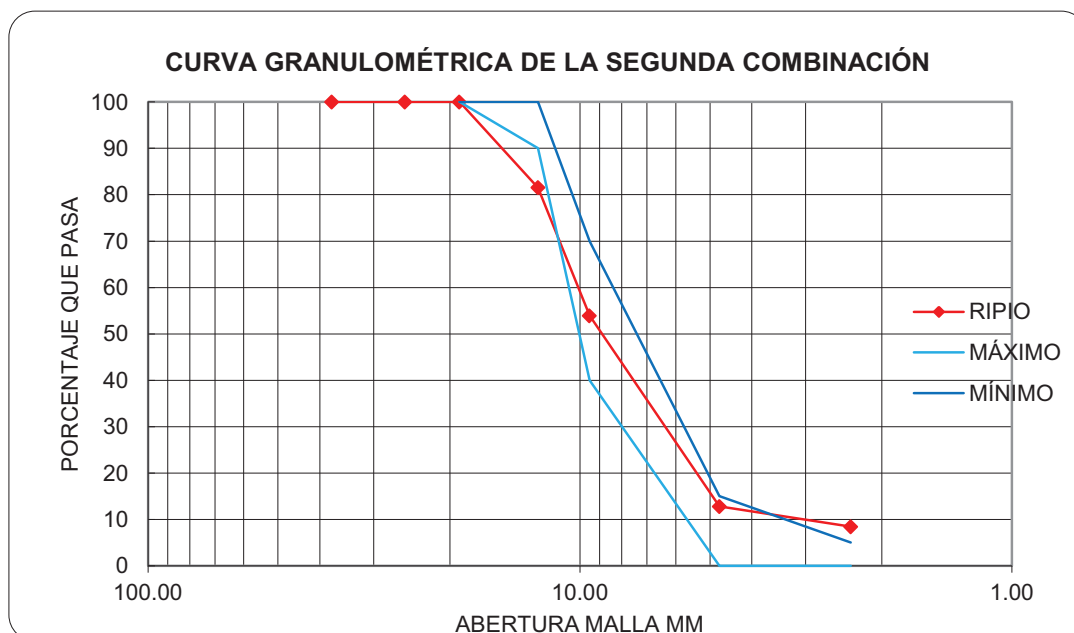
Cuadro 12. Granulometría de la primera combinación 20% de 3/4" y 80% de 1/2".

MUESTRA No. 1: Granulometría de la primera combinación.				
TAMICES	PESO RETENIDO (g)	RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO PASA
3" (76.1 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
2" (51.8mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2" (38.1 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
1" (25.4mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4" (19.0 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2" (12.5 mm)	664.00	664.00	13.35	86.65
3/8" (9.51 mm)	1 551.00	2 215.00	44.53	55.47
No. 4 (4.76 mm)	2 455.00	4 670.00	93.89	6.11
No. 8 (2.36 mm)	161.00	4 831.00	97.13	2.87
Pasa No. 8	143.00	4 974.00		
PESO INICIAL DE LA MUESTRA (g):			5 000.00	
TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL:			0.5 pulg	



Cuadro 13. Granulometría de la segunda combinación 30% de 3/4" y 70% de 1/2".

MUESTRA No. 1: Granulometría de la segunda combinación.				
TAMICES	PESO RETENIDO (g)	RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO PASA
3" (76.1 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
2" (51.8mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2" (38.1 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
1" (25.4 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4" (19.0 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2" (12.5 mm)	1 290.00	1 290.00	18.46	81.54
3/8" (9.51 mm)	1 930.00	3 220.00	46.08	53.92
No. 4 (4.76 mm)	2 873.00	6 093.00	87.19	12.81
No. 8 (2.36 mm)	305.00	6 398.00	91.56	8.44
Pasa No. 8	590.00	6 988.00		
PESO INICIAL DE LA MUESTRA (g):			7 000.00	
TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL:			0.75 pulg	

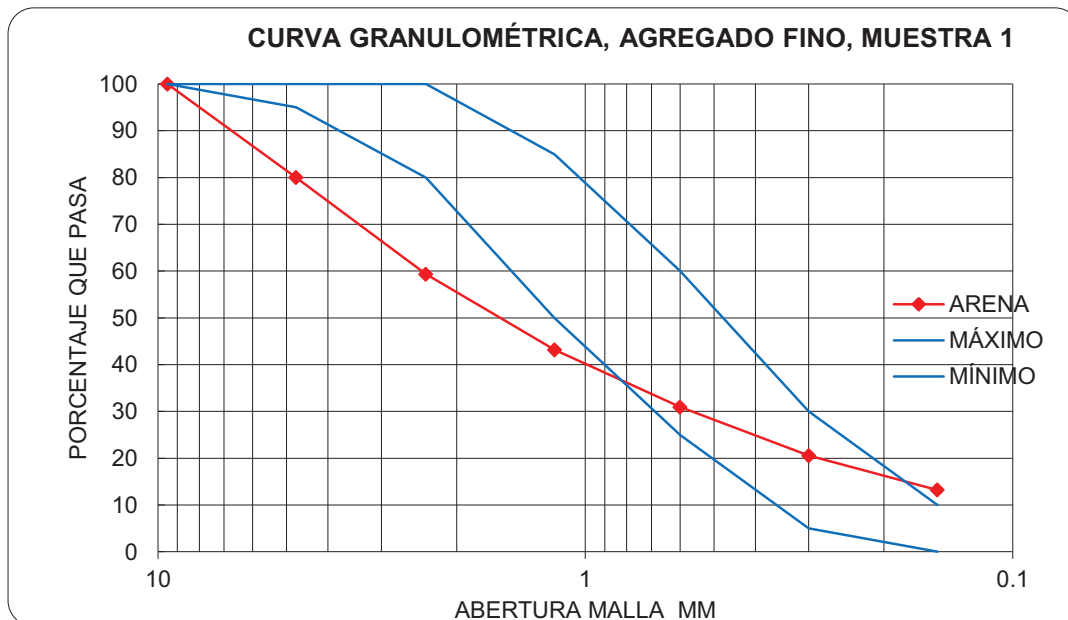


Puesto que la primera combinación cumple los requisitos de gradación del NEVI-12, más que la segunda opción, se trabajará con la estabilidad granulométrica de 20% de árido de TM= 3/4" y 80% de árido de TM= 1/2", como agregado grueso del proyecto tanto para el diseño de mezclas de hormigón con agregados convencionales y mezclas de hormigón con escoria de acero.

3.2.1.3 Granulometría del agregado fino.

Cuadro 14. Granulometría del agregado fino, muestra 1.

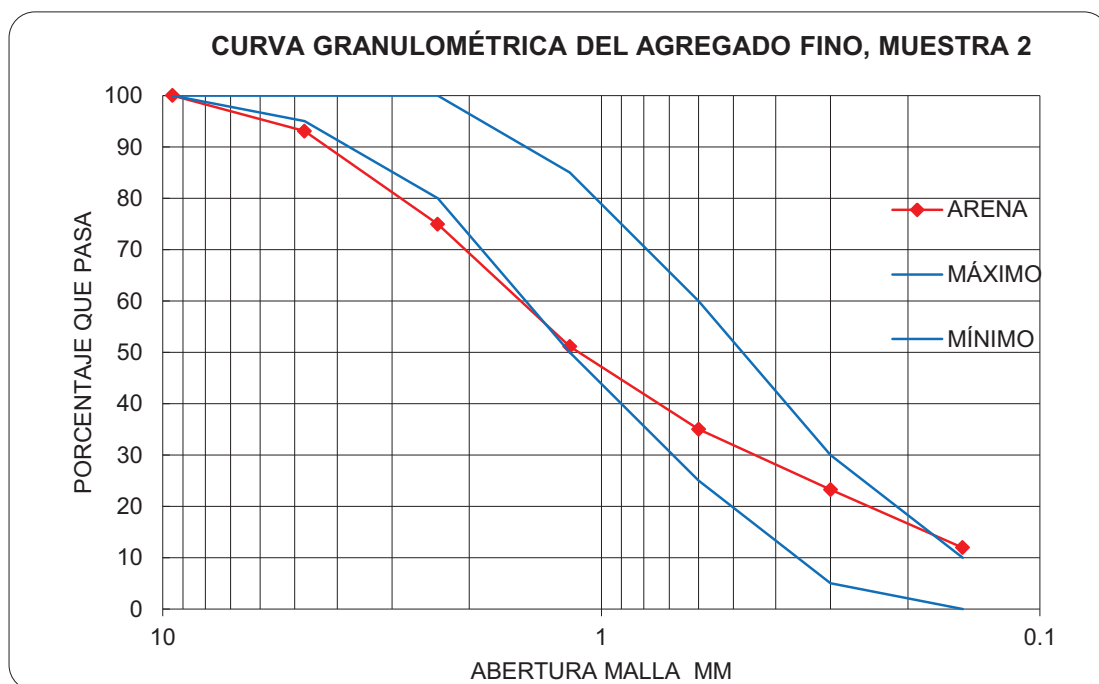
MUESTRA No.1: Agregado fino directo de la cantera.				
TAMICES	PESO RETENIDO (g)	RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO PASA TOTAL
3/8" (9.5mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
No. 4 (4.76 mm)	360.00	360.00	20.00	80.00
No. 8 (2.36 mm)	372.00	732.00	40.67	59.33
No. 16 (1.18 mm)	291.00	1 023.00	56.83	43.17
No. 30 (0.6 mm)	220.00	1 243.00	69.06	30.94
No. 50 (0.30mm)	187.00	1 430.00	79.44	20.56
No. 100 (0.15 mm)	132.00	1 562.00	86.78	13.22
Pasa No 100	238.00	1 800.00		
PESO INICIAL DE LA MUESTRA (g):			1 800.00	
MÓDULO DE FINURA:			3.5	



La muestra 1 de agregado fino natural no se ajusta a los requisitos de gradación para árido fino estipulados en el NEVI-12, por lo que se realizó una estabilización de este agregado pasándole por el tamiz 1/4", esta muestra 2 generada si cumple con los requisitos del NEVI-12; por lo tanto la muestra 2 será el agregado fino natural base con el que se trabaja durante este proyecto para realizar las mezclas de hormigón hidráulico con agregados convencionales, y su granulometría se la puede apreciar en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Granulometría del agregado fino, muestra 2.

MUESTRA No. 2: Agregado fino pasante del tamiz 1/4".				
TAMICES	PESO RETENIDO (g)	RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO PASA TOTAL
3/8" (9.5mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
No. 4 (4.76 mm)	73.00	73.00	6.93	93.07
No. 8 (2.36 mm)	191.00	264.00	25.05	74.95
No. 16(1.18 mm)	251.00	515.00	48.86	51.14
No. 30 (0.6 mm)	170.00	685.00	64.99	35.01
No. 50 (0.30mm)	124.00	809.00	76.76	23.24
No. 100 (0.15 mm)	119.00	928.00	88.05	11.95
Pasa No. 100	126.00	1 054.00		
PESO INICIAL DE LA MUESTRA (g):		1 054.00		
MÓDULO DE FINURA:		3.1		

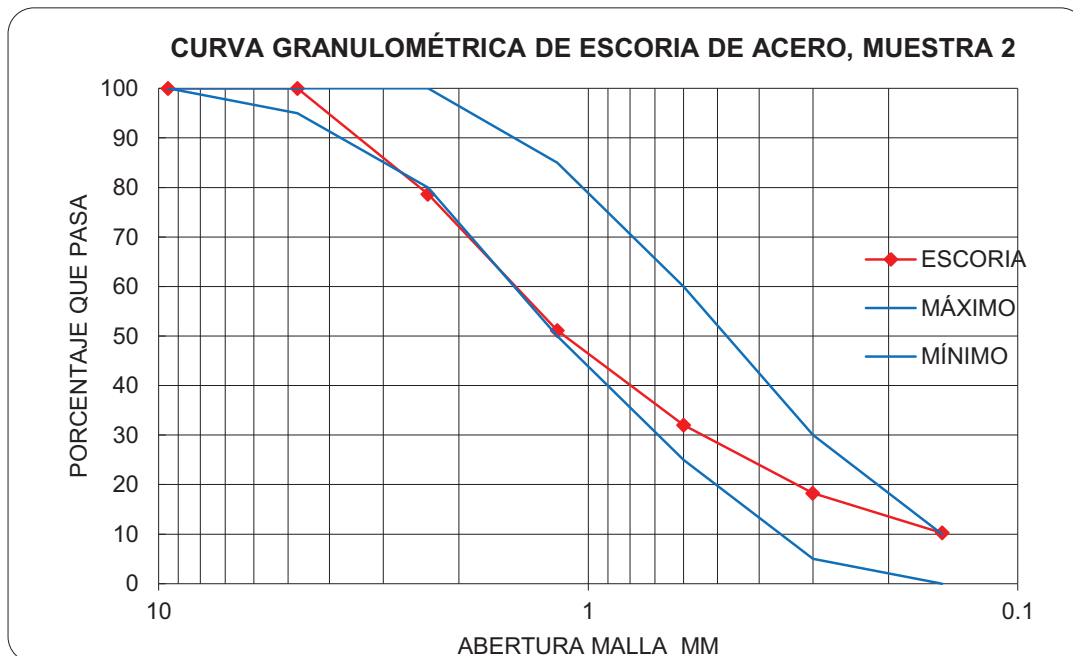


3.2.1.4 Estabilización granulometría de la escoria de acero.

En el segundo capítulo se determinó la granulometría de la escoria de acero directa de los depósitos de la empresa siderúrgica, la cual no cumplió los requisitos de gradación de agregado fino, a esta escoria se le estabilizó pasándole por el tamiz No. 4 (4.75 mm) y esta muestra 2 de escoria cumple con los requisitos de gradación para áridos finos del NEVI-12; por tanto la escoria pasante del tamiz No. 4 es el agregado siderúrgico fino que se utilizará para el diseño de mezclas de hormigón hidráulico con escoria de acero.

Cuadro 16. Granulometría de la escoria de acero, muestra 2.

MUESTRA No. 2: Escoria de acero pasante del tamiz No. 4.				
TAMICES	PESO RETENIDO (g)	RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO PASA TOTAL
3/8" (9.5 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
No. 4 (4.76 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
No. 8 (2.36 mm)	171.00	171.00	21.38	78.63
No. 16 (1.18 mm)	220.00	391.00	48.88	51.13
No. 30 (0.6 mm)	153.00	544.00	68.00	32.00
No. 50 (0.30 mm)	110.00	654.00	81.75	18.25
No. 100 (0.15 mm)	64.00	718.00	89.75	10.25
Pasa No. 100	82.00	800.00		
PESO INICIAL DE LA MUESTRA (g):		1 100.00		
MÓDULO DE FINURA:		3.1		



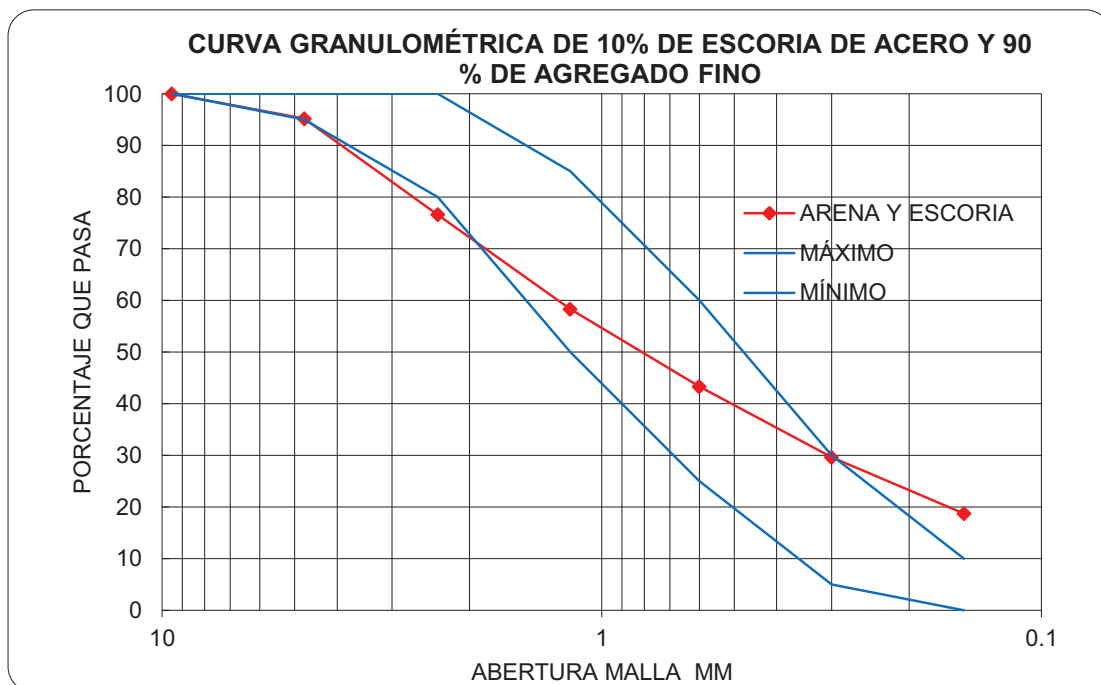
3.2.1.5 Combinaciones de agregado fino y escoria de acero.

Con el propósito de determinar la granulometría de la escoria de acero como agregado en la producción de hormigón se empezó por realizar combinaciones entre la escoria y el agregado fino natural; al 100% de agregado fino natural (arena) se le resta 10% en peso de su material y se añade el 10% en peso de escoria de acero, de tal manera que se propone incrementar el porcentaje de escoria en 10%, 20%, 30%, etc. La primera combinación está definida con el 10% de escoria de acero y 90% de arena, la segunda combinación es 20% de escoria de acero y 80% de arena, la tercera combinación es 30% de escoria de acero y 70% de arena y así sucesivamente se iría aumentando el porcentaje de escoria de acero hasta llegar al 100% escoria de acero.

Los siguientes cuadros muestran las combinaciones de escoria de acero y agregado fino que se realizó y se puede ver que no se ajustan a los límites granulométricos recomendados.

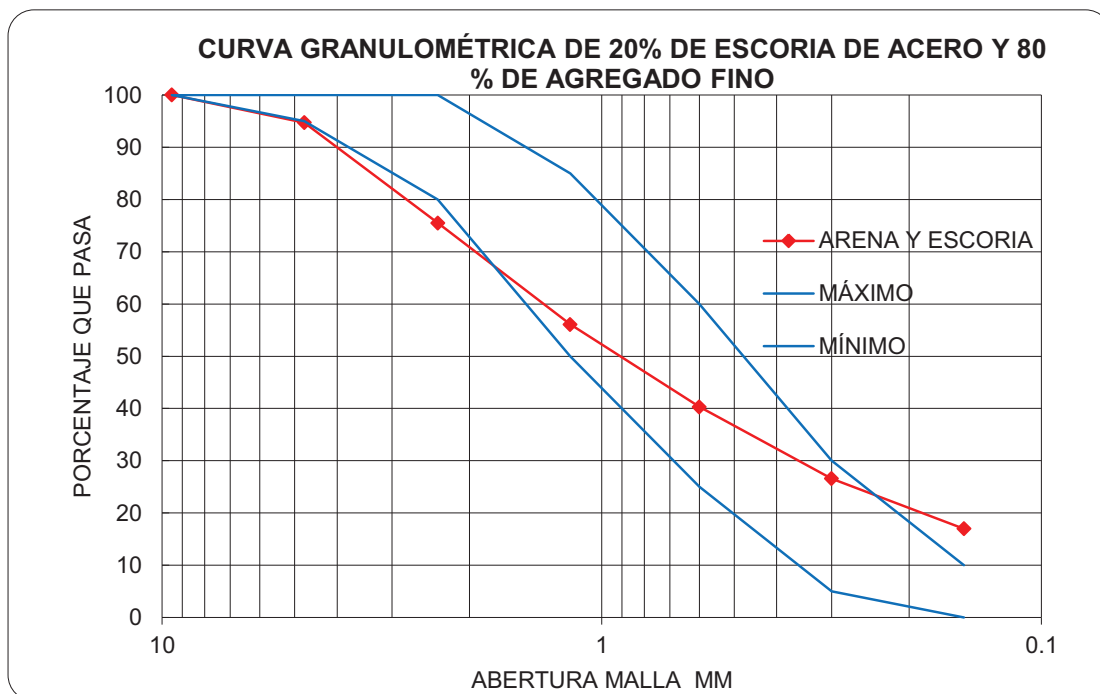
Cuadro 17. Granulometría de 10% de escoria de acero y 90% de agregado fino.

MUESTRA No.1: 10% de escoria de acero y 90% de agregado fino.				
TAMICES	PESO RETENIDO (g)	RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO PASA TOTAL
3/8" (9.5 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
No. 4 (4.76 mm)	48.00	48.00	4.80	95.20
No. 8 (2.36 mm)	186.00	234.00	23.40	76.60
No. 16 (1.18 mm)	183.00	417.00	41.70	58.30
No. 30 (0.6 mm)	150.00	567.00	56.70	43.30
No. 50 (0.30 mm)	137.00	704.00	70.40	29.60
No. 100 (0.15 mm)	109.00	813.00	81.30	18.70
Pasa No. 100	187.00	1 000.00		
PESO INICIAL DE LA MUESTRA (g):		1 000.00		
MÓDULO DE FINURA:		2.8		



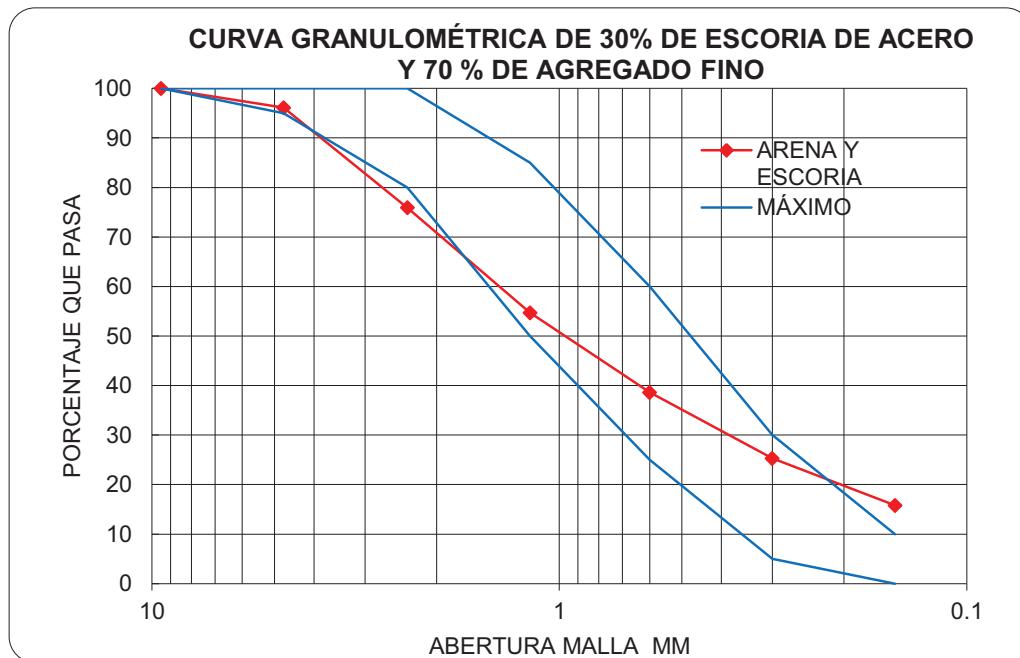
Cuadro 18. Granulometría de 20% de escoria de acero y 80% de agregado fino.

MUESTRA No.1: 20% de escoria de acero y 80% de agregado fino.				
TAMICES	PESO RETENIDO (g)	RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO PASA TOTAL
3/8" (9.5 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
No. 4 (4.76 mm)	53.00	53.00	5.30	94.70
No. 8 (2.36 mm)	192.00	245.00	24.50	75.50
No. 16 (1.18 mm)	194.00	439.00	43.90	56.10
No. 30 (0.6 mm)	158.00	597.00	59.70	40.30
No. 50 (0.30 mm)	137.00	734.00	73.40	26.60
No. 100 (0.15 mm)	96.00	830.00	83.00	17.00
Pasa No. 100	170.00	1 000.00		
PESO INICIAL DE LA MUESTRA (g):	1 000.00			
MÓDULO DE FINURA:	2.9			



Cuadro 19. Granulometría de 30% de escoria de acero y 70% de agregado fino.

MUESTRA No.1: 30% de escoria de acero y 70% de agregado fino.				
TAMICES	PESO RETENIDO (g)	RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO PASA TOTAL
3/8" (9.5 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
No. 4 (4.76 mm)	39.00	39.00	3.90	96.10
No. 8 (2.36 mm)	202.00	241.00	24.10	75.90
No. 16 (1.18 mm)	212.00	453.00	45.30	54.70
No. 30 (0.6 mm)	161.00	614.00	61.40	38.60
No. 50 (0.30 mm)	133.00	747.00	74.70	25.30
No. 100 (0.15 mm)	95.00	842.00	84.20	15.80
Pasa No. 100	158.00	1 000.00		
PESO INICIAL DE LA MUESTRA (g):			1 000.00	
MÓDULO DE FINURA:			2.9	



Debido a que las combinaciones de la escoria de acero y agregado fino no cumplen con la faja granulométrica; mientras que la granulometría de la escoria de acero sola pasante del tamiz No. 4, encaja en la faja granulométrica con normalidad y dado que una de las metas de esta tesis es disminuir los depósitos improductivos de escorias de acero, se opta por sustituir el 100% de agregado fino de origen natural por la escoria de acero en la producción de hormigón.

Para mejor ilustración de que la granulometría de la escoria fina de acero cumple los requisitos de gradación mejor que las combinaciones de arena-escoria de acero se presenta en la Figura 30 el conjunto de dichas granulometrías.

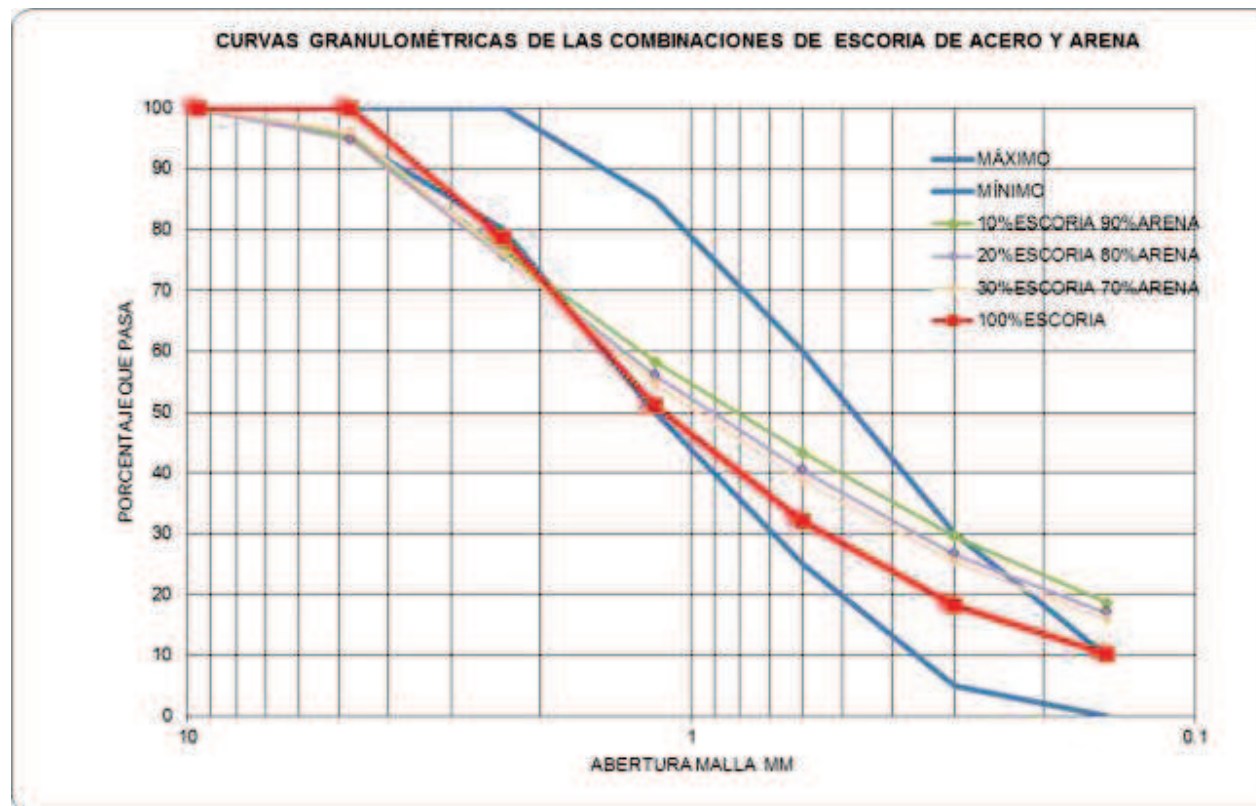


Figura 30. Conjunto de curvas granulométricas de combinaciones arena - escoria y curva granulométrica solo de escoria de acero.

Una vez definidas las granulometrías de agregado grueso (grava), agregado fino natural (arena) y agregado siderúrgico (escoria de acero), las cuales cumplen con los requisitos de gradación del NEVI-12, se prosigue con el estudio de caracterización de las mismas en cuanto a peso específico, absorción, densidad varillada, densidad suelta y contenido de humedad.

3.2.2 Gravedad específica y absorción del agregado fino, grueso y escoria de acero. ASTM C 127 y ASTM C 128.

Cuadro 20. Gravedad específica y absorción del agregado fino.

VARIABLES	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	CANTIDADES
A	PESO EN EL AIRE DE LA MUESTRA SECADA AL HORNO	(g)	487.60
V	VOLUMEN DE LA PROBETA	(cm ³)	500.00
W	PESO EN GRAMOS O VOLUMEN EN ml. DEL AGUA AÑADIDA	(cm ³)	305.90
$A/(V-W)$	GRAVEDAD ESPECÍFICA DE MASA	(g/cm ³)	2.51
$500/(V-W)$	GRAVEDAD ESPECÍFICA SATURADA SUPERFICIE SECA	(g/cm ³)	2.58
$A/((V-W)-(500-A))$	GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE	(g/cm ³)	2.68
$(500-A/A)*100$	ABSORCIÓN DE AGUA	(%)	2.54
OBSERVACIONES:	Temperatura ensayo = 25°C.		

Cuadro 21. Gravedad específica y absorción del agregado grueso.

VARIABLES	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	CANTIDADES
A	PESO EN EL AIRE DE LA MUESTRA SECADA AL HORNO	(g)	4 870.00
B	PESO EN EL AIRE DE LA MUESTRA SATURADA	(g)	5 000.00
C	PESO EN EL AGUA DE LA MUESTRA SATURADA	(g)	3 034.00
γ	PESO ESPECÍFICO DEL AGUA A LA TEMPERATURA QUE SE REALIZÓ EL ENSAYO	(g/cm ³)	1.00
$(A/(B-C))*\gamma$	GRAVEDAD ESPECÍFICA DE MASA	(g/cm ³)	2.47
$(B/(B-C))*\gamma$	GRAVEDAD ESPECÍFICA SATURADA SUPERFICIE SECA SSS	(g/cm ³)	2.54
$(A/(A-C))*\gamma$	GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE	(g/cm ³)	2.64
$(B-A/A)*100$	ABSORCIÓN DE AGUA	(%)	2.67

Cuadro 22. Gravedad específica y absorción de la escoria siderúrgica.

VARIABLES	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	CANTIDADES
A	PESO EN EL AIRE DE LA MUESTRA SECADA AL HORNO	(g)	491.50
V	VOLUMEN DE LA PROBETA	(cm ³)	500.00
W	PESO EN GRAMOS O VOLUMEN EN ml. DEL AGUA AÑADIDA	(cm ³)	357.50
$A/(V-W)$	GRAVEDAD ESPECÍFICA DE MASA	(g/cm ³)	3.45
$500/(V-W)$	GRAVEDAD ESPECÍFICA SATURADA SUPERFICIE SECA	(g/cm ³)	3.51
$A/((V-W)-(500-A))$	GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE	(g/cm ³)	3.67
$(500-A/A)*100$	ABSORCIÓN DE AGUA	(%)	1.73
OBSERVACIONES: Temperatura de ensayo = 25°C.			

3.2.3 Densidad suelta y compactada de agregado fino, grueso y escoria de acero. ASTM C 29.

Cuadro 23. Ensayo ASTM C 29 del agregado fino.


DENSIDAD SUELTA DE ARENA			
DESCRIPCIÓN	CANTIDADES		
Molde No.	M1	M1	M1
Peso del molde (g)	6 640.00	6 640.00	6 640.00
Peso molde + suelo (g)	27 460.00	27 570.00	27 740.00
Peso suelo (g)	20 820.00	20 930.00	21 100.00
Volumen (cm ³)	14 235.34	14 235.34	14 235.34
Densidad suelta (g/cm ³)	1.46	1.47	1.48
Media	1.47		

DENSIDAD COMPACTADA DE ARENA			
DESCRIPCIÓN	CANTIDADES		
Molde No.	M1	M1	M1
Peso del molde (g)	6 640.00	6 640.00	6 640.00
Peso molde + suelo (g)	28 634.00	29 000.00	29 013.00
Peso suelo (g)	21 994.00	22 360.00	22 373.00
Volumen (cm ³)	14 235.34	14 235.34	14 235.34
Densidad compactada (g/cm ³)	1.55	1.57	1.57
Media	1.56		

Cuadro 24. Ensayo ASTM C 29 del agregado grueso.

DENSIDAD SUELTA DE LA GRAVA			
DESCRIPCIÓN	CANTIDADES		
Molde No.	M1	M1	M1
Peso del molde (g)	6 640.00	6 640.00	6 640.00
Peso molde + suelo (g)	26 332.00	26 465.00	26 365.00
Peso suelo (g)	19 692.00	19 825.00	19 725.00
Volumen (cm ³)	14 235.34	14 235.34	14 235.34
Densidad suelta (g/cm ³)	1.38	1.39	1.39
Media (g/cm ³)	1.39		

DENSIDAD COMPACTADA DE LA GRAVA			
DESCRIPCIÓN	CANTIDADES		
Molde No.	M1	M1	M1
Peso del molde (g)	6 640.00	6 640.00	6 640.00
Peso molde + suelo (g)	28 009.00	28 109.00	28 166.00

CONTINÚA 

Peso suelo (g)	21 369.00	21 469.00	21 526.00
Volumen (cm ³)	14 235.34	14 235.34	14 235.34
Densidad compactada (g/cm ³)	1.50	1.51	1.51
Media (g/cm ³)	1.51		

Cuadro 25. Ensayo ASTM C 29 de la escoria de acero.

DENSIDAD SUELTA DE LA ESCORIA DE ACERO			
DESCRIPCIÓN	CANTIDADES		
Molde No.	M1	M1	M1
Peso del molde (g)	6 640.00	6 640.00	6 640.00
Peso molde + suelo (g)	34 431.00	34 906.00	34 805.00
Peso suelo (g)	27 791.00	28 266.00	28 165.00
Volumen (cm ³)	14 235.34	14 235.34	14 235.34
Densidad suelta (g/cm ³)	1.95	1.99	1.98
Media	1.97		

DENSIDAD COMPACTA DE LA ESCORIA DE ACERO			
DESCRIPCIÓN	CANTIDADES		
Molde No.	M1	M1	M1
Peso del molde (g)	6 640.00	6 640.00	6 640.00
Peso molde + suelo (g)	36 611.00	36 722.00	36 640.00
Peso suelo (g)	29 971.00	30 082.00	30 000.00
Volumen (cm ³)	14 235.34	14 235.34	14 235.34
Densidad compactada (g/cm ³)	2.11	2.11	2.11
Media	2.11		

3.2.4 Contenido de humedad en el agregado fino, grueso y escoria de acero por secado. ASTM C 566.

Cuadro 26. Ensayo ASTM C 566 del agregado fino.

DESCRIPCIÓN	ARENA	
	MUESTRA 1	MUESTRA 2
RECIPIENTE	R-1	R-2
PESO DEL RECIPIENTE (g)	165.10	165.50
PESO DEL RECIPIENTE + MUESTRA HUMEDA (g)	761.70	805.10
PESO DEL RECIPIENTE + MUESTRA SECA (g)	727.60	768.72
PESO DEL AGUA (g)	34.10	36.38

CONTINUÁ 

PESO SECO (g)	562.50	603.22
% AGUA	6.06	6.03
% AGUA PROMEDIO	6.05	
OBSERVACIONES: Temperatura del horno 110 °C		

Cuadro 27. Ensayo ASTM C 566 del agregado grueso.

DESCRIPCIÓN	AGREGADO GRUESO	
	MUESTRA 1	MUESTRA 2
RECIPIENTE	T-1	T-2
PESO DEL RECIPIENTE (g)	165.50	165.50
PESO DEL RECIPIENTE + MUESTRA HUMEDA (g)	1249.30	1249.30
PESO DEL RECIPIENTE + MUESTRA SECA (g)	1215.19	1217.10
PESO DEL AGUA (g)	34.11	32.20
PESO SECO (g)	1049.69	1051.60
% AGUA	3.25	3.06
% AGUA PROMEDIO	3.16	
OBSERVACIONES: Temperatura del horno 110 °C		

Cuadro 28. Ensayo ASTM C 566 de la escoria de acero.

DESCRIPCIÓN	ESCORIA DE ACERO	
	MUESTRA 1	MUESTRA 2
RECIPIENTE	R-11	R-12
PESO DEL RECIPIENTE (g)	122.10	124.00
PESO DEL RECIPIENTE + MUESTRA HUMEDA (g)	632.55	463.15
PESO DEL RECIPIENTE + MUESTRA SECA (g)	632.35	462.85
PESO DEL AGUA (g)	0.20	0.30
PESO SECO (g)	510.25	338.85
% AGUA	0.04	0.09
% AGUA PROMEDIO	0.06	
OBSERVACIONES: Temperatura del horno 110°C.		

3.2.5 Determinación del valor de la degradación del árido grueso mediante el uso de la Máquina de los Ángeles. ASTM C 131.

La norma establece el método de ensayo para determinar el valor de la degradación del árido grueso de tamaño inferior a 37.5 mm, mediante la pérdida de masa por desgaste e impacto utilizando la máquina de Los Ángeles. El valor

de la degradación es utilizado como indicador de la calidad relativa o de la competencia de áridos y fuentes de áridos, que tienen composiciones mineralógicas similares.

3.2.5.1 Equipo.

- Máquina de los ángeles, debe estar compuesta por un cilindro de acero hueco, con espesor de pared no menor que 12.4 mm, cerrado en ambos extremos, que tenga un diámetro interno de $711 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ y longitud interna de $508 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$. Para cubrir la abertura, debe estar provisto de una tapa apropiada que no deje escapar el polvo, con dispositivos para atornillar la tapa en su lugar. Una plataforma de acero, extendida toda la longitud del cilindro y proyectada hacia el interior en $89 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$. La posición de la plataforma debe ser tal que la muestra y las esferas de acero no golpeen en o cerca de la abertura y su tapa.
- Tamices: 1/2", 3/8" y No. 12.
- Balanza con una precisión de por lo menos 0.1% de la carga de ensayo en cualquier punto dentro del rango de uso para este método de ensayo.
- Carga, la carga consiste en esferas de acero que promedien aproximadamente 47 mm de diámetro, que cada una tenga una masa de entre 390 y 445 g. Dependiendo de la gradación de la muestra de ensayo debe cumplir con la Tabla 7.

Tabla 7. Especificaciones de carga.

Gradación	Número de esferas	Masa de la carga (g)
A	12	5 000 ± 25
B	11	4 584 ± 25
C	8	3 330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Fuente: (ASTM C 131, 2004)

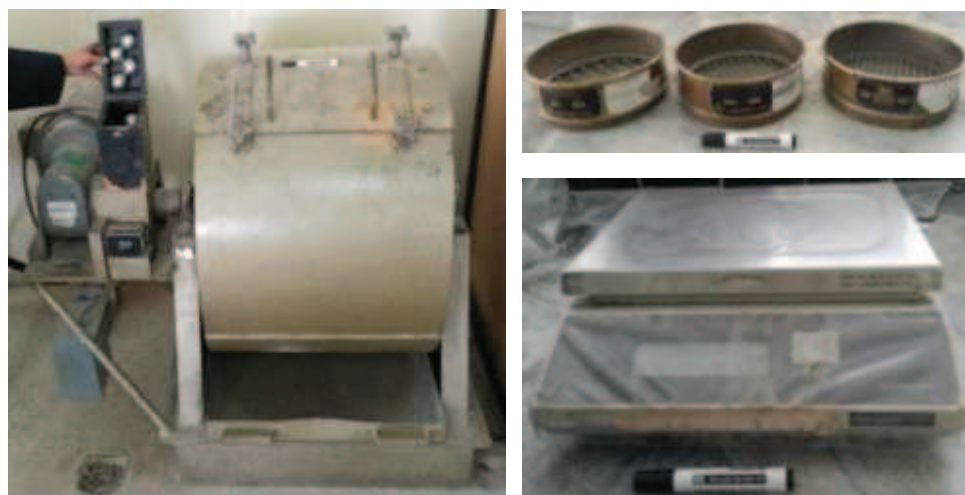


Figura 31. Equipo para ensayo ASTM C 131.

3.2.5.2 Materiales.

- La cantidad de muestra se determina en función de la Tabla 8. Según esto, se necesita 5 000 ± 10 gr de agregado grueso.

Tabla 8. Gradación de las muestras de ensayo.

Tamaño de las aberturas de tamiz (mm) (aberturas cuadradas)		Masa por tamaños indicada (g)			
Pasante de	Retenido en	Gradación			
		A	B	C	D
37,5	25,0	1 250 ± 25	---	---	---
25,0	19,0	1 250 ± 25	---	---	---
19,0	12,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10	---	---
12,5	9,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10	---	---
9,5	6,3	---	---	2 500 ± 10	---
6,3	4,75	---	---	2 500 ± 10	---
4,75	2,36	---	---	---	5 000 ± 10
Total		5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10

Fuente: (ASTM C 131, 2004).



Figura 32. Muestra de agregado grueso para el ensayo de abrasión.

3.2.5.3 Procedimiento.

- Lavar la muestra y secarla al horno a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener masa prácticamente constante, hasta obtener la gradación indicada en la Tabla 3 que mejor represente al rango de tamaños del árido proporcionado para el ensayo.
- Registrar la masa de la muestra antes del ensayo con aproximación de 1 g.

- Colocar la muestra y la carga para el ensayo en la máquina de Los Ángeles, girar la máquina 500 revoluciones, a una velocidad entre 30 r/min y 33 r/min.
- Después del número prescrito de revoluciones, descargar el material de la máquina y realizar una separación preliminar de la muestra sobre un tamiz de mayor abertura que el de 1.70 mm. Tamizar la porción fina por el tamiz de 1.70 mm. Lavar el material más grueso que 1.70 mm y secarlo al horno a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa prácticamente constante.
- Si el árido esencialmente no contiene recubrimientos adherentes y polvo, el requisito del lavado luego del ensayo es opcional. Sin embargo, para el caso de ensayos de arbitraje, se debe realizar el procedimiento de lavado.

3.2.5.4 Resultados.

Cuadro 29. Resultado de gradación del árido grueso.

Gradación escogida de la muestra: Tipo B			
VARIABLES	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALORES
B	Masa del material no desgastado	(gr)	5 000.00
C	Masa del material retenido en el tamiz #12 después del ensayo	(gr)	3 486.70
B-C	Pérdida por desgaste	(gr)	1 513.30
$D=(B-C)/B*100$	Valor de la degradación en porcentaje	(%)	30.27

El porcentaje de desgaste a la abrasión obtenido es menor que el 50%, por tanto cumple satisfactoriamente este requisito para ser árido grueso de mezclas de hormigones.

3.3 Resumen de caracterización de agregado grueso, fino y siderúrgico.

Después de realizar la caracterización de los agregados que se utilizará en el diseño de mezclas de hormigón de peso normal se presenta un resumen de los mismos en el siguiente cuadro.

Cuadro 30. Resumen de caracterización de agregados.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	AGREGADOS		
		FINO	GRUESO	ESCORIA
GRAVEDAD ESPECÍFICA DE MASA	Kg/m ³	2 512.11	2 469.80	3 449.12
GRAVEDAD ESPECÍFICA SATURADA SUPERFICIE SECA	Kg/m ³	2 575.99	2 535.73	3 508.77
GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE	Kg/m ³	2 683.54	2 644.67	3 667.91
ABSORCIÓN DE AGUA	%	2.54	2.67	1.73
MÓDULO DE FINURA	-	3.10	-	3.10
CONTENIDO DE HUMEDAD	%	6.05	3.16	0.06
TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL	pulg	-	1/2	-
DENSIDAD SUELTA	Kg/m ³	1 471.69	1 387.20	1 972.13
DENSIDAD COMPACTADA	Kg/m ³	1 562.47	1 507.14	2 108.67

Como se puede ver en el resumen de caracterización de agregados naturales (arena y grava) y el árido siderúrgico (escoria de acero) la gravedad: específica, saturada y aparente de la escoria es 1.37 veces mayor que los de la arena. En cuanto a la densidad suelta y compactada la escoria de acero es 1.35 veces más pesada que la arena, lo cual indica que el hormigón hidráulico con escoria de acero será más pesado que el hormigón hidráulico convencional.

En cuanto al contenido de humedad también difieren los valores, pero estos pueden variar dependiendo del sitio de almacenamiento y los factores ambientales como humedad relativa, temperatura, etc. El porcentaje de absorción de agua de la arena es 1.47 veces mayor que la absorción de la escoria de acero, es una ventaja de la escoria de acero ya que "entre menos porosidad presente el agregado mayor es la resistencia mecánica del hormigón hidráulico" (Asocreto, 2000, pág. 89)

CAPÍTULO 4

DISEÑO DE DOSIFICACIÓN Y DISEÑO EXPERIMENTAL PARA HORMIGÓN HIDRÁULICO CONVENCIONAL Y HORMIGÓN HIDRÁULICO CON ESCORIA DE ACERO.

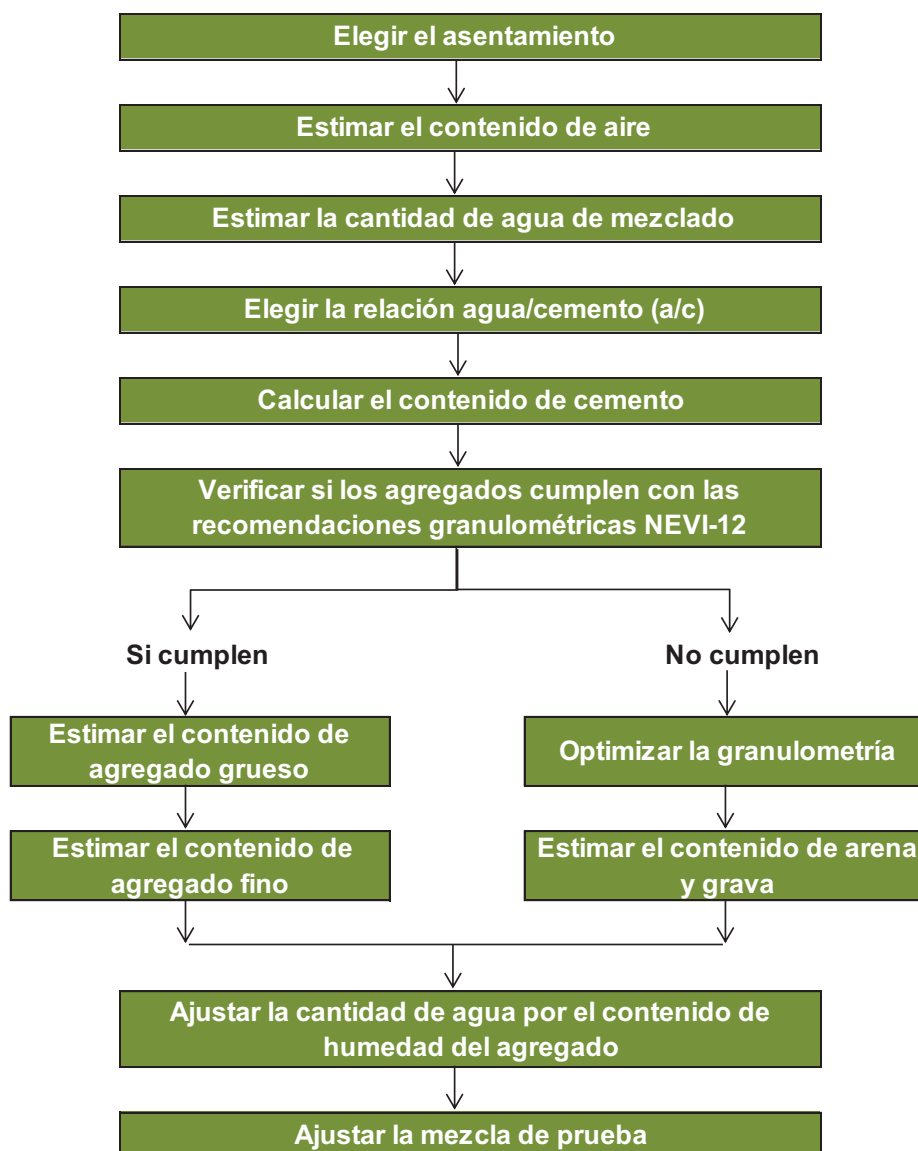
En este apartado se realiza el proceso de dosificación de mezclas de hormigón hidráulico, haciendo uso del Método ACI 211; de tal manera que se tenga una dosificación inicial convencional con materiales estándares: arena, grava, agua y cemento; hormigón con escoria: escoria de acero, grava, agua y cemento; hormigón con escoria y aditivo: escoria de acero, grava, agua, cemento y aditivo.

Dosificar una mezcla de hormigón hidráulico es determinar la combinación más práctica de los agregados disponibles, cemento, agua y en ciertos casos aditivos con el fin de producir una mezcla con el grado requerido de manejabilidad, que al endurecer a la velocidad apropiada adquiera las características de resistencia y durabilidad necesarias para el tipo de construcción en que habrá de utilizarse.

El método americano ACI es el más conocido y ampliamente usado. Consiste en una secuencia de pasos que determinan la cantidad de cada

material en peso y en volumen para 1.00 m³ de hormigón. En la Tabla 9 se muestra un esquema de los pasos de dosificación.

Tabla 9. Secuencia de pasos para la dosificación de mezclas.



Fuente: (Asocreto, 2000)

Cabe aclarar que en el capítulo 3 de la presente tesis se efectuó la estabilidad granulométrica de los agregados naturales y el agregado siderúrgico, para ingresarlos en franjas de especificación granulométrica según los requisitos del NEVI-12 para diseño de hormigón hidráulico. Por otra parte las tablas expuestas a continuación sirven de guía en el proceso de dosificación tanto del hormigón hidráulico con áridos naturales como para el hormigón hidráulico con escoria de acero.

Tabla 10. Valores de asentamiento recomendados para diversas clases de construcción.

ASENTAMIENTO (cm)	CONSISTENCIA (TIPO DE CONCRETO)	GRADO DE TRABAJABILIDAD	TIPO DE ESTRUCTURA Y CONDICIONES DE COLOCACIÓN
0 - 2.0	Muy seca	Muy pequeño	Vigas o pilotes de alta resistencia con vibradores de formaleta.
2.0 - 3.5	Seca	Pequeño	Pavimentos vibrados con máquina mecánica.
3.5 - 5	Semi-seca	Pequeño	Construcciones en masas voluminosas. Losas medianamente reforzadas con vibración. Fundaciones en concreto simple. Pavimentos con vibradores normales.
5.0 - 10.0	Media	Medio	Losas medianamente reforzadas y pavimentos, compactados o a mano. Columnas, vigas, fundaciones y muros, con vibración.
10.0 - 15.0	Húmeda	Alto	Secciones con mucho refuerzo. Trabajos donde la colocación sea difícil. Revestimiento de túneles. No recomendable para compactado con demasiada vibración.

Fuente: (Asocreto, 2000)

Tabla 11. Contenido aproximado de aire en el concreto para varios grados de exposición.

AGREGADO GRUESO		PORCENTAJE PROMEDIO APROXIMADO DE AIRE ATRAPADO	PORCENTAJE PROMEDIO TOTAL DE AIRE RECOMENDADO PARA LOS SIGUIENTES GRADOS DE EXPOSICIÓN		
Pulgadas	mm		Suave	Mediano	Severo
3/8	9.51	3.0	4.5	6.0	7.5
1/2	12.50	2.5	4.0	5.5	7.0
3/4	19.10	2.0	3.5	5.0	6.0
1	25.40	1.5	3.0	4.5	6.0
1 1/2	38.10	1.0	2.5	4.5	5.5
2	50.80	0.5	2.0	4.0	5.0
3	76.10	0.3	1.5	3.5	4.5
6	152.40	0.2	1.0	3.0	4.0

Fuente: (Asocreto, 2000)

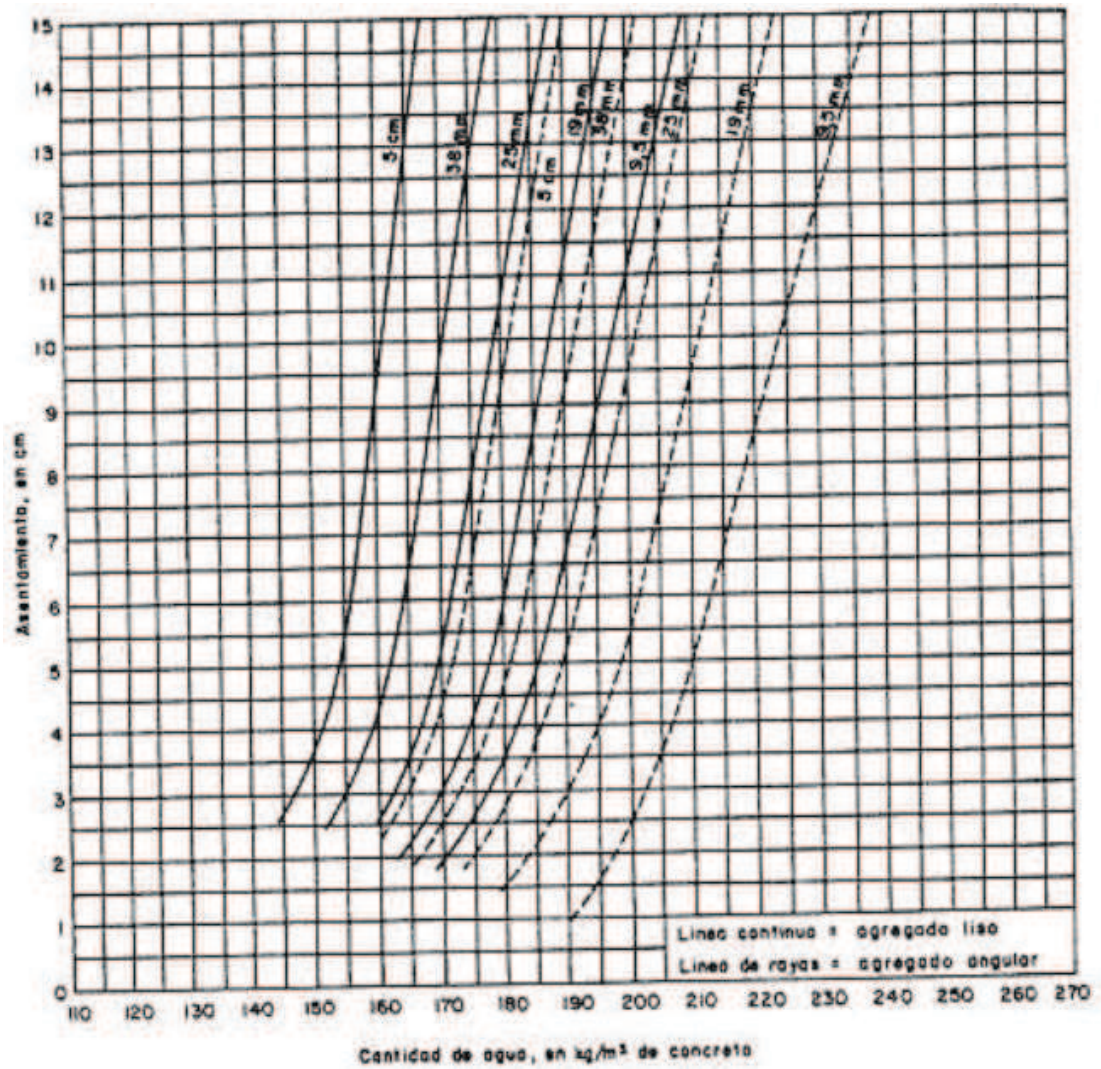


Figura 33. Requerimientos de agua de mezclado.

Fuente: (Asocreto, 2000)

Tabla 12. Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y TMN del agregado.

CONDICIONES DEL CONTENIDO DE AIRE	ASENTAMIENTO (cm)	AGUA EN Kg/m ³ DE CONCRETO PARA LOS TMN DEL AGREGADO INDICADOS							
		10	12.5	20	25	40	50	70	150
CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO	3 a 5	2015	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	-
	Cantidad aproximada de aire atrapado en el concreto sin aire incluido, por ciento.	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
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	16	-
	Promedio recomendable de contenido total de aire por ciento.	8	7	6	5	4	3	2	1

Fuente: (Asocreto, 2000)

Tabla 13. Relación entre la resistencia a la compresión y algunos valores de la relación a/c.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS (Kg/cm ²)	CONCRETO SIN INCLUSOR DE AIRE	CONCRETO CON INCLUSOR DE AIRE
	RELACIÓN ABSOLUTA POR PESO	RELACIÓN ABSOLUTA POR PESO
175	0.65	0.56
210	0.58	0.5
245	0.52	0.46
280	0.47	0.42
315	0.43	0.38
350	0.40	0.35

Fuente: (Asocreto, 2000)

Tabla 14. Volumen de gravilla por unidad de volumen de concreto.

Máximo tamaño nominal de agregados		Volumen de agregado grueso secado en el horno por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finura de agregado fino			
		MÓDULO DE FINURA			
Pulgadas	mm	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8	9.51	0.50	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	0.60
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	0.80	0.78	0.76
6	152.4	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: (Asocreto, 2000)

4.1 Hormigón hidráulico convencional con materiales estándares: arena, grava, cemento y agua.

Para realizar la dosificación de hormigón hidráulico convencional, se presenta primero el cuadro de datos tanto del cemento como los agregados grueso y fino de origen natural (grava y arena) necesarios para la dosificación y seguido de ello se muestra el procedimiento de cálculo de dosificación en sí, para mayor facilidad de comprensión del lector se enumeró secuencialmente los pasos de dicho proceso de dosificación hasta la obtención de las cantidades de

materiales requeridos. A continuación en la Cuadro 31 se presenta la dosificación de hormigón hidráulico convencional con el ajuste de agua de mezclado, es decir, se añadió 2.78% en peso de agua de mezcla calculada para 1.00 m³ de hormigón hidráulico. Con esta premisa se obtuvo tanto la resistencia requerida a la compresión como el asentamiento estimado, cabe mencionar que estas dos últimas características cumplen con lo estipulado en las normas INEN Y NEC-11.

Cuadro 31. Dosificación de hormigón hidráulico convencional $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.**DATOS**

CEMENTO	Densidad del cemento =	3148.61	kg/m ³
----------------	------------------------	---------	-------------------

AGREGADO GRUESO			
Tamaño máximo =	3/4 pulg	19.05	mm
Tamaño máximo nominal =	1/2 pulg	12.70	mm
Masas unitarias:			
Masa unitaria compactada MUC =	1 507.14	kg/m ³	
Masa unitaria suelta MUS =	1 387.20	kg/m ³	
Densidad aparente =	2 644.67	kg/m ³	
Absorción Absg =	2.67 %	0.0267	-
Humedad natural Hg =	0 %	0	-
Origen aluvial, textura y forma:	agregado angular		

AGREGADO FINO			
Módulo de finura =	3.10	-	
Masas unitarias:			
Masa unitaria compactada MUC =	1 562.47	kg/m ³	
Masa unitaria suelta MUS =	1 471.69	kg/m ³	
Densidad aparente =	2 683.54	kg/m ³	
Absorción Absf =	2.54 %	0.025	-
Humedad natural Hf =	0 %	0	-
Origen aluvial, textura y forma:	agregado angular		

PROCEDIMIENTO

1. ELECCIÓN DEL ASENTAMIENTO	
Seleccione el asentamiento en la	Tabla 10
Asentamiento adoptado =	5.00 cm

2. ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE AIRE	
Seleccione la estimación del contenido de aire en la	Tabla 11
% prom de aire atrapado =	2.50 % = 25.00 lts = 0.025 m ³ /m ³

3. ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE AGUA DE MEZCLADO (a)			
Cantidad de agua obtenida de la	Figura 33	=	206.00 lts
Cantidad de agua obtenida de la	Tabla 12	=	200 kg/m ³
Se adopta la máxima cantidad de agua	=	206.00 lts	206 kg/m ³ 0.206 m ³ /m ³

4. ESTIMACIÓN DE LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO (a/c)	
Resistencia requerida $f'c$ =	210 kg/cm ²
Aire incluido (sin/con):	sin
Estime la relación a/c en la Tabla 13	
Estimado de la relación a/c =	0.58

5. CÁLCULO DEL CONTENIDO DEL CEMENTO	
$c = \frac{\text{cant. de agua}}{\text{relac. a/c}} = \frac{206.00}{0.58} = 355.17 \text{ kg/m}^3$	
El volumen del cemento por m ³ de concreto será	
$V_c = \frac{\text{peso de cemento por m}^3 \text{ de concreto}}{\text{densidad del cemento}} = \frac{355.17}{3148.61} = 0.11 \text{ m}^3/\text{m}^3$	


6. VERIFICACIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES GRANULOMÉTRICAS	
Los agregados deben cumplir con las especificaciones granulométricas; es decir, debe estar dentro de la faja granulométrica, caso contrario obligatoriamente debe realizar la estabilización granulométrica para continuar con el cálculo de dosificación.	

7. ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE LA GRAVA	
Estime el contenido de grava en la	Tabla 14
Estimado del cont de grava b/bo =	0.53
Volumen de partículas de agregado grueso por m ³ de agregado grueso (bo')	
$b_o' = \frac{MUC}{d_g} = \frac{1507.14}{2644.67} = 0.57$	
Volumen de la grava por m ³ de concreto (B)	
$B = \frac{b}{b_o} \times b_o' = 0.30 \text{ m}^3/\text{m}^3$	

8. ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE ARENA	
Volumen de arena (VA) es la resta de:	
$VA = 1 - (\% \text{ aire} + a + Vc + B)$	
VA =	0.35 m ³ /m ³

9. CANTIDADES PREVIAS PARA 1 m³ DE LA MEZCLA			
MATERIAL	DENSIDAD Di Kg/m ³	VOLUMEN Vi m ³ /m ³	PESO Wi Kg/m ³
Cemento	3 148.61	0.11	355.17
Aire	0.00	0.025	0.00
Agua	1 000.00	0.206	206.00
Grava	2 644.67	0.302	798.78
Arena	2 683.54	0.354	950.41
TOTAL	-	1.00	2 310.36

10. PESOS HÚMEDOS DE LOS AGREGADOS	
10.1 Peso húmedo de la grava	
$Mhg = M_g(1 + Hg)$	
Mh g =	799.00 kg/m ³
Hg <	Abs g → a la grava le falta agua
Entonces:	
$A_g = M_g(Hg \pm Abs_g)$	
Ag =	21.33 kg
10.2 Peso húmedo de la arena	
$Mhf = M_f(1 + Hf)$	
Mh f =	950.00 kg/m ³
Hf <	Abs f → a la arena le falta agua
Entonces:	
$A_f = M_f(Hf \pm Abs_f)$	
Af =	24.14 kg
10.3 Agua total en exceso (A)	
$A = A_g + A_f = 45.47 \text{ kg}$	
Entonces la cantidad de agua de mezclado será:	
a-A =	160.53 Kg/m ³

CONTINÚA 

11. AGUA DE MEZCLADO TOTAL PARA 1 m³
 Se despeja a de la relación a/c, entonces:
 $a = 0.58 \times 355$
 $a = 206.00 \text{ kg} = 206.00 \text{ lt}$
 Entonces el agua de mezclado será:
 $A_{\text{mezclado}} = a + [M_g(H_g \pm Abs_g)] + [M_f(H_f \pm Abs_f)]$
 $A_{\text{mezclado}} = 251.47 \text{ kg} = 251.47 \text{ lt}$

12. RESUMEN DE LAS CANTIDADES PARA 1 m³ DE LA MEZCLA

MATERIAL	DENSIDAD	VOLUMEN	PESO	AJUSTES POR HUMEDAD
	D ₁ kg/m ³			V ₁ m ³ /m ³
Cemento	3 148.61	0.11	355.17	355.17
Aire	0.00	0.03	0.00	0.00
Agua	1 000.00	0.21	206.00	251.47
Grava	2 644.67	0.30	798.78	799.00
Arena	2 683.54	<u>0.35</u>	<u>950.41</u>	950.00
TOTAL	-	1.00	2 310.36	-

• DOSIFICACIÓN PARA N CILINDROS Y N VIGAS DE HORMIGÓN CONVENCIONAL

Volumen requerido: 0.0991 m³
 f'c requerido a los 28 días: 210 kg/cm²
 Núm de cilindros a fundir: 8 unidades
 Núm de vigas a fundir: 4 unidades

MATERIALES	CANTIDADES	
Cemento	35.21 Kg	0.70 qq
Aire	0.00 Kg	
Agua	23.23 lt	23 232.95 ml
Grava	79.18 kg	
Arena	94.21 kg	

Preparado por: Cuásquer J. y Altamirano S. (2015).

Con la obtención de la dosificación óptima, más adelante se procede a elaborar y curar especímenes cilíndricos y vigas que se precisa para realizar los ensayos del hormigón hidráulico en su estado fresco y endurecido; en este mismo capítulo se describe dichos ensayos con los respectivos resultados.

4.2 Hormigón hidráulico con escoria: escoria de acero, grava, cemento y agua.

Cabe mencionar que la misma dosificación que se calculó para el hormigón hidráulico convencional se usó para la preparación de muestras de hormigón hidráulico con escoria de acero propuesto en esta tesis.

A la dosificación de hormigón hidráulico también se le añadió un porcentaje en peso de agua de mezcla extra de 2.80% para 1.00 m³ de hormigón; con esta deducción se obtiene el asentamiento estimado y se proyecta que la resistencia a la compresión del hormigón con escoria de acero aumente con respecto al hormigón convencional. A continuación en el Cuadro 32 se presenta la dosificación del hormigón hidráulico con escoria de acero.

Cuadro 32. Dosificación de hormigón hidráulico con escoria de acero de 210 Kg/cm².

DATOS

CEMENTO	Densidad del cemento =	3148.61 kg/m ³
----------------	------------------------	---------------------------

AGREGADO GRUESO		
Tamaño máximo =	3/4 pulg	19.05 mm
Tamaño máximo nominal =	1/2 pulg	12.70 mm
Masas unitarias:		
Masa unitaria compactada MUC =	1 507.14 kg/m ³	
Masa unitaria suelta MUS =	1 387.20 kg/m ³	
Densidad aparente =	2 644.67 kg/m ³	
Absorción Absg =	2.67 %	0.0267 -
Humedad natural Hg =	0 %	0 -
Origen aluvial, textura y forma:	agregado angular	

ESCORIA DE ACERO		
Módulo de finura =	3.10 -	
Masas unitarias:		
Masa unitaria compactada MUC =	2 108.67 kg/m ³	
Masa unitaria suelta MUS =	1 972.13 kg/m ³	
Densidad aparente =	3 667.91 kg/m ³	
Absorción Absf =	1.73 %	0.017 -
Humedad natural Hf =	0 %	0 -
Origen, textura y forma:	ADELCA, agregado angular	

PROCEDIMIENTO

1. ELECCIÓN DEL ASENTAMIENTO

Seleccione el asentamiento en la Tabla 10
Asentamiento adoptado = 5.00 cm

2. ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE AIRE

Seleccione la estimación del contenido de aire en la Tabla 11
% prom de aire atrapado = 2.50 % = 25.00 lts = 0.025 m³/m³

3. ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE AGUA DE MEZCLADO (a)

Cantidad de agua obtenida de la Figura 33 = 206.00 lts = 206 kg/m³
Cantidad de agua obtenida de la Tabla 12 = 200.00 lts = 200 kg/m³
Se adopta la máxima cantidad de agua = 206.00 lts = 206 kg/m³ = 0.206 m³/m³

4. ESTIMACIÓN DE LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO (a/c)

Resistencia requerida f'c = 210 kg/cm²
Aire incluido (sin/con): sin -
Estime la relación a/c en la Tabla 13
Estimado de la relación a/c = 0.58 -

5. CÁLCULO DEL CONTENIDO DEL CEMENTO

$$c = \frac{\text{cont. de agua}}{\text{relac. a/c}} = \frac{206.00}{0.58} = 355.17 \text{ kg/m}^3$$

El volumen del cemento por m³ de concreto será
$$V_c = \frac{\text{peso de cemento por m}^3 \text{ de concreto}}{\text{densidad del cemento}} = \frac{355.17}{3148.61} = 0.11 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

6. VERIFICACIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES GRANULOMÉTRICAS

Los agregados deben cumplir con las especificaciones granulométricas; es decir, debe estar dentro de la faja granulométrica, caso contrario obligatoriamente debe realizar la estabilización granulométrica para continuar con el cálculo de dosificación.

7. ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE LA GRAVA

Estime el contenido de grava en la Tabla 14
Estimado del cont de grava b/b₀ = 0.53 -
Volumen de partículas de agregado grueso por m³ de agregado grueso (b₀)
$$b_0 = \frac{MUC}{d_g} = \frac{1507.14}{2644.67} = 0.57$$

Volumen de la grava por m³ de concreto (B)
$$B = \frac{b}{b_0} \times b_0 = 0.30 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

8. ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE ESCORIA DE ACERO

Volumen de escoria (VE) es la resta de:
$$VE = 1 - (\% \text{ aire} + a + V_c + B)$$

VE = 0.35 m³/m³

9. CANTIDADES PREVIAS PARA 1 m³ DE LA MEZCLA

MATERIAL	DENSIDAD D _i kg/m ³	VOLUMEN V _i m ³ /m ³	PESO W _i Kg/m ³
Cemento	3 148.61	0.11	355.17
Aire	0.00	0.025	0.00
Agua	1 000.00	0.206	206.00
Grava	2 644.67	0.302	798.78
Escoria	3 667.91	0.354	1 299.03
TOTAL	-	1.00	2 658.99

10. PESOS HÚMEDOS DE LOS AGREGADOS

10.1 Peso húmedo de la grava

$$Mhg = Mg(1 + Hg)$$

Mh g = 799.00 kg/m³
Hg < Abs g → a la grava le falta agua

Entonces:

$$Ag = Mg(Hg \pm Ah \times g)$$

Ag = 21.33 kg

10.2 Peso húmedo de la escoria de acero

$$Mhf = Mf(1 + Hf)$$

Mh f = 1299.00 kg/m³
Hf < Abs f → a la escoria le falta agua

Entonces:


$$Af = Mf(Hf \pm Ah \times f)$$

Af = 22.47 kg

10.3 Agua total en exceso (A)

$$A = Ag + Af = 43.80 \text{ kg}$$

Entonces la cantidad de agua de mezclado será:
a-A = 162.20 Kg/m³

CONTINÚA 

11. AGUA DE MEZCLADO TOTAL PARA 1 m³
 Se despeja a de la relación a/c, entonces:
 $a = 0.58 \times 355$
 $a = 206.00 \text{ kg} = 206.00 \text{ lt}$
 Entonces el agua de mezclado será:
 $A_{\text{mezclado}} = a + [Mg(Hg \pm Absg)] + [Mf(Hf \pm Absf)]$
 $A_{\text{mezclado}} = 249.80 \text{ kg} = 249.80 \text{ lt}$

12. RESUMEN DE LAS CANTIDADES PARA 1 m³ DE LA MEZCLA

MATERIAL	DENSIDAD	VOLUMEN	PESO	AJUSTES POR HUMEDAD
	D ₁ kg/m ³	V ₁ m ³ /m ³	W ₁ Kg/m ³	W ₁ Kg/m ³
Cemento	3 148.61	0.11	355.17	355.17
Aire	0.00	0.03	0.00	0.00
Agua	1 000.00	0.21	206.00	249.80
Grava	2 644.67	0.30	798.78	799.00
Escoria	3 667.91	0.35	1 299.03	1299.00
TOTAL	-	1.00	2 658.99	-

• DOSIFICACIÓN PARA N CILINDROS Y N VIGAS DE HORMIGÓN CON ESCORIA DE ACERO

Volumen requerido: 0.1122 m³
 f'c requerido a los 28 días: 210 kg/cm²
 Núm de cilindros a fundir: 8 unidades
 Núm de vigas a fundir: 5 unidades

MATERIALES	CANTIDADES
Cemento	39.86 Kg
Aire	0.00 Kg
Agua	25.95 lt
Grava	89.66 kg
Escoria	145.80 kg

0.80 qq
25 949.02 ml

Preparado por: Cuásquer J. y Altamirano S. (2015).

4.3 Hormigón hidráulico con escoria y aditivo: escoria de acero, grava, cemento, agua y aditivo.

Como se vio en el capítulo 2 la escoria de acero presenta oxidación en su superficie y "se conoce que la oxidación que está presente en el acero de refuerzo embebido en el hormigón estructural, produce corrosión al hormigón endurecido con el paso del tiempo dependiendo del sitio y los factores medioambientales" (Moreno, López, & Madrid, 2001). Este fenómeno podría presentarse en el hormigón con escoria de acero propuesto en esta tesis, entonces para prevenir este inconveniente se opta por utilizar un inhibidor de corrosión en el hormigón recién mezclado, el cual forma una capa protectora

sobre la escoria de acero, retrasando el proceso de corrosión y por ende alargando la vida útil de la estructura.

Es importante indicar que el aditivo utilizado no altera el tiempo de fraguado así como también no altera significativamente las propiedades del hormigón hidráulico en estado fresco ni endurecido (AGRECONS, S.A, 2015).

La dosificación del hormigón hidráulico con escoria de acero y aditivo es la misma que la dosificación de hormigón hidráulico con escoria, salvo que se le añade directamente a la mezcla este aditivo en proporción de 1.50 Kg de aditivo por cada metro cúbico de hormigón hidráulico dosificado. A continuación se presenta el resumen de cantidades de materiales de dicha dosificación.

Cuadro 33. Resumen de materiales de dosificación de hormigón con escoria de acero y aditivo.

• DOSIFICACIÓN PARA N CILINDROS Y N VIGAS DE HORMIGÓN CON ESCORIA DE ACERO Y ADITIVO			
Volumen requerido:	0.1122	m ³	
f'c requerido a los 28 días:	210	kg/cm ²	
Núm de cilindros a fundir :	8	unidades	
Núm de vigas a fundir :	5	unidades	
MATERIALES	CANTIDADES		
Cemento	39.86	Kg	0.80 qq
Aire	0.00	Kg	
Agua	25.95	lt	25 949.02 ml
Grava	89.66	kg	
Escoria	145.80	kg	
Aditivo	0.17	lt	168.36 ml

Preparado por: Cuásquer J. y Altamirano S. (2015).

Al tener las dosificaciones tanto para el hormigón hidráulico con agregados naturales y el hormigón hidráulico con escoria de acero se prosigue

con los ensayos de hormigón en estado fresco y posteriormente con los ensayos de hormigón en estado endurecido.

4.4 Ensayos del hormigón hidráulico en estado fresco.

En este numeral se describe los ensayos realizados tanto para el hormigón hidráulico convencional como para el hormigón hidráulico con escoria de acero y hormigón hidráulico con escoria de acero y aditivo, al final de cada ensayo se mostrará los resultados obtenidos de los mismos.

4.4.1 Muestreo del concreto recién mezclado, ASTM C172.

Esta norma establece los procedimientos para la obtención de muestras representativas de hormigón fresco, como el que se entrega en el lugar del proyecto, sobre el cual se van a realizar ensayos para determinar el cumplimiento con los requisitos de calidad establecidos en las normas bajo las cuales se despacha el hormigón.

4.4.1.1 Muestreo

- El tiempo transcurrido entre la obtención de la primera y la última porción de la muestra compuesta no debe exceder de 15 minutos. Entiéndase como muestra compuesta a la combinación de dos o más porciones individuales integradas y remezcladas.
- Transportar las muestras individuales al lugar en donde se efectuarán los ensayos al hormigón fresco o en donde los especímenes de ensayo van a

ser moldeados. Estas deben ser combinadas y remezcladas con una pala, en la cantidad mínima necesaria para garantizar la uniformidad.

- Iniciar los ensayos de asentamiento, temperatura y contenido de aire dentro de los 5 minutos posteriores a la obtención de la última porción de la muestra compuesta. Completar estos ensayos rápidamente. Iniciar el moldeo de especímenes para ensayos de resistencia dentro de los 15 minutos siguientes a la obtención de la muestra. Obtener y utilizar rápidamente la muestra protegiéndola del sol, del viento, de otras causas de evaporación rápida y de la contaminación.

4.4.1.2 Procedimiento

- **Tamaño de la muestra.** El volumen mínimo de las muestras que se van a utilizar para los ensayos de resistencia debe ser de 28 litros. Se pueden utilizar muestras de volúmenes más pequeños para ensayos de rutina de contenido de aire, temperatura y asentamiento. El tamaño de las muestras debe estar definido por el tamaño máximo del árido.
- **Muestreo en mezcladores estacionarios.** Muestrear el hormigón mediante la recolección de dos o más porciones tomadas en intervalos espaciados regularmente durante la descarga de la porción media de la amasada. Si la descarga del hormigón es demasiado rápida para desviar el flujo completo de ésta, descargar el hormigón en un contenedor o unidad de transporte suficientemente grande para dar cabida a toda la amasada y a continuación, realizar el muestreo de la misma manera mencionada anteriormente. Tener

cuidado de no restringir el flujo del hormigón del mezclador, contenedor o unidad de transporte, para no causar segregación. Estos requisitos se aplican tanto a los mezcladores inclinados como a los no inclinados.



Figura 34. Mezclador estacionario inclinado utilizado en la fundición.

4.4.1.3 Resultados.

Cuadro 34. Acta de muestreo de hormigón convencional.

Lugar, fecha y hora del muestreo.
Lugar: Laboratorio de suelos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
Fecha: 16-04--2015
Hora: 8:40 am
Hormigón elaborado en obra.
Número de parada : 1
Condiciones climáticas durante el muestreo: soleado.
Procedimiento utilizado para el muestreo: muestreo en mezcladores estacionarios.
Observaciones: ninguna.

Cuadro 35. Acta de muestreo de hormigón con escoria de acero.

Lugar, fecha y hora del muestreo.
Lugar: Laboratorio de suelos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
Fecha: 16-04--2015
Hora: 10:55 am
Hormigón elaborado en obra.
Número de parada : 1
Condiciones climáticas durante el muestreo: soleado.
Procedimiento utilizado para el muestreo: muestreo en mezcladores estacionarios.
Observaciones: ninguna.

Cuadro 36. Acta de muestreo de hormigón con escoria de acero y aditivo.

Lugar, fecha y hora del muestreo.
Lugar: Laboratorio de suelos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
Fecha: 16-04--2015
Hora: 12:51 pm
Hormigón elaborado en obra.
Número de parada : 1
Condiciones climáticas durante el muestreo: soleado - nublado
Procedimiento utilizado para el muestreo: muestreo en mezcladores estacionarios.
Observaciones: ninguna.

4.4.2 Temperatura del concreto con cemento portland recién mezclado, ASTM C 1064.

Este método de ensayo cubre la determinación de la temperatura de mezclas de concreto hidráulico recién mezclado. La temperatura medida representa la temperatura al tiempo del ensayo y puede no ser indicativa de la temperatura del concreto recién mezclado a un tiempo posterior. Puede ser

usado para verificar que el concreto satisfaga un requisito específico de temperatura.

4.4.2.1 Equipo.

- Recipiente. El recipiente debe ser lo suficientemente grande para que por lo menos 75 mm (3 pulg) de concreto cubran en todas direcciones el sensor del dispositivo medidor de temperatura. El espesor de la cubierta de concreto debe ser además de por lo menos tres veces mayor que el tamaño nominal máximo del agregado grueso.
- Dispositivo medidor de temperatura. El aparato medidor de temperatura debe ser capaz de medir con exactitud, la temperatura de la mezcla de concreto recién mezclado con una aproximación de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ dentro de un rango de 0°C a 50°C . El diseño del dispositivo sensor de temperatura debe ser tal que permita una inmersión de 75 mm (3 pulg) o más, durante la operación.



Figura 35. Equipo y muestra para realizar el ensayo de temperatura.

4.4.2.2 Muestreo del concreto.

Es aceptable medir la temperatura del concreto recién mezclado bien sea en el equipo de transporte o en las formaletas, después de la descarga, siempre que el dispositivo medidor de temperatura esté rodeado por al menos 75 mm (3 pulg) de concreto en todas direcciones.




4.4.2.3 Procedimiento.

Colocar el dispositivo medidor de temperatura, de modo que el sensor de temperatura esté sumergido al menos 75 mm (3 pulg) en el concreto recién mezclado. Presionar suavemente la superficie del concreto alrededor del dispositivo medidor de temperatura, para cerrar los vacíos provocados por la inmersión y para que la temperatura del aire circundante no afecte la medición.

Dejar el dispositivo medidor de temperatura en la mezcla de concreto recién mezclado por un período mínimo de dos minutos, pero no más de cinco minutos; entonces leer y registrar la misma, con una aproximación de 0.5°C. No retirar del concreto el dispositivo, cuando haga la lectura.

4.4.2.4 Resultados.

Cuadro 37. Resultados del ensayo de temperatura del concreto recién mezclado.

DESCRIPCIÓN	Temperatura	Período de tiempo medido	Registro fotográfico
Tipo de hormigón	°C	minutos	
Convencional	21.00	2	
Con escoria	23.50	2	
Con escoria y aditivo	23.10	2	

Según la norma INEN 1855-1 Requisitos de hormigón recién mezclado, estipula que la temperatura mínima del hormigón es 13°C considerando que el hormigón producido en esta tesis servirá para la construcción de elementos estructurales sobre piso como losas, cimentaciones, elementos que tienen

espesores de 30 cm o menos; y no debe exceder de 32°C, esto nos indica que el hormigón obtenido está dentro del rango con respecto a la temperatura.

4.4.3 Determinación del asentamiento del hormigón de cemento hidráulico. ASTM C 143.

Esta norma establece el método de ensayo para determinar el asentamiento del hormigón de cemento hidráulico tanto en el laboratorio como en el campo.

4.4.3.1 Equipos.

- Molde. El espécimen para ensayo debe ser elaborado en un molde de metal que no sea fácilmente atacado por la pasta de cemento. El molde debe tener la forma de un cono truncado, con diámetros internos de 200 mm en la base, 100 mm en la parte superior y altura de 300 mm. Los diámetros y alturas individuales deben tener una tolerancia de ± 3 mm de las dimensiones especificadas. El interior debe estar relativamente liso y libre de imperfecciones, abolladuras, deformaciones o de mortero adherido.
- Varilla de compactación. Debe ser una varilla recta, lisa, de acero, de 16 mm de diámetro y aproximadamente 600 mm de longitud, teniendo el extremo de compactación o los dos extremos redondeados con punta semiesférica, cuyo diámetro es de 16 mm.
- Instrumento de medida. Puede utilizarse una regla, cinta de medir enrollada de metal o un instrumento similar de medición rígido o semirrígido, marcado

en incrementos de 5 mm o menos. La longitud del instrumento debe ser de al menos 300 mm.

- Cucharón. De un tamaño lo suficientemente grande para que cada cantidad de hormigón obtenida del recipiente de muestreo sea representativa y lo suficientemente pequeño como para que no se derrame durante la colocación en el molde.



Figura 36. Equipo para realizar un ensayo de asentamiento.

4.4.3.2 Muestreo.

La muestra de hormigón para elaborar los especímenes de ensayo debe ser representativa de toda la amasada. Debe ser obtenida de acuerdo con los procedimientos descritos en la ASTM C 172.

4.4.3.3 Procedimiento.

Humedecer el molde y colocarlo sobre una superficie plana, rígida, húmeda y no absorbente. El operador debe sostener firmemente el molde en su lugar durante el llenado y la limpieza del perímetro, parándose sobre los dos

estribos. Inmediatamente después de obtener la muestra de hormigón, llenar el molde en tres capas, cada una de aproximadamente un tercio del volumen del molde. Colocar el hormigón en el molde utilizando el cucharón. Mover el cucharón siguiendo el perímetro de la abertura del molde para asegurar una distribución uniforme del hormigón con una mínima segregación.

Compactar cada capa con 25 golpes utilizando la varilla de compactación. Distribuir de manera uniforme los golpes sobre la sección transversal de cada capa. Para la capa inferior, es necesario inclinar la varilla ligeramente y dar aproximadamente la mitad de los golpes cerca del perímetro y luego continuar con golpes verticales en espiral hacia el centro.

Al llenar la capa superior, mantener un excedente de hormigón sobre la parte superior del molde antes de empezar la compactación. Si durante la operación de compactación, la superficie del hormigón queda por debajo del borde superior del molde, agregar más hormigón para mantener en todo momento un exceso de hormigón sobre la parte superior del molde. Después de haber compactado la capa superior, enrasar la superficie del hormigón rodando la varilla de compactación sobre el borde superior del molde. Continuar presionando el molde firmemente hacia abajo y retirar el hormigón del área que rodea la base del molde para evitar interferencias con el movimiento de asentamiento del hormigón.




De inmediato retirar el molde del hormigón levantándolo cuidadosamente en dirección vertical. Levantar el molde en su altura de 300 mm en $5 \text{ s} \pm 2 \text{ s}$ con

un movimiento ascendente uniforme y sin movimientos laterales o de torsión. Completar todo el ensayo desde el inicio del llenado hasta la remoción del molde sin interrupción dentro de un periodo de 2 1/2 minutos.

Inmediatamente medir el asentamiento determinando la diferencia vertical entre la parte superior del molde y el centro original desplazado de la superficie superior del espécimen. Si ocurre un desprendimiento o corte del hormigón de una parte o porción de la masa, desechar el ensayo y hacer un nuevo ensayo con otra porción de la muestra.

4.4.3.4 Resultados.

Cuadro 38. Resultados del ensayo de asentamiento del concreto recién mezclado.

DESCRIPCIÓN	Asentamiento	Registro fotográfico
Tipo de hormigón	mm	
Convencional	50.00	
Con escoria	40.00	
Con escoria y aditivo	40.00	

Las medidas del ensayo de asentamiento resultantes están en el rango que se establece en la norma INEN 1855 Requisitos del hormigón premezclado, la cual estipula que la tolerancia del asentamiento de 50 mm es +/- 15 mm.

4.4.4 Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo. ASTM C31.

Esta norma establece los procedimientos para elaborar y curar cilindros y vigas, tomados de muestras representativas de hormigón fresco, utilizado en la construcción de una obra.

4.4.4.1 Equipos.

- Moldes para cilindros. La longitud debe ser el doble del diámetro y el diámetro del cilindro debe ser por lo menos 3 veces el tamaño máximo nominal del árido grueso. Para ensayos de aceptación de la resistencia a compresión especificada, los cilindros deben ser de 150 mm x 300 mm o de 100 mm x 200 mm.
- Moldes para vigas. Los moldes para la elaboración de vigas deben tener la forma y dimensiones requeridas para producir los especímenes estipulados. La longitud debe ser por lo menos 50 mm mayor que tres veces la altura, respecto de cómo va a ser ensayada. La relación entre ancho y altura, respecto de cómo se moldea, no debe exceder de 1.5; la viga normalizada debe tener una sección transversal de 150 mm x 150 mm y debe ser utilizada para hormigón con árido grueso de hasta 50 mm de tamaño máximo nominal.
- Varilla de compactación. Varilla de acero, recta, lisa y de sección circular, con un diámetro que cumpla los requisitos de la Tabla 7. La longitud de la

varilla de compactación debe ser de por lo menos 100 mm mayor que la profundidad del molde en el cual se está realizando la compactación, pero no mayor de 600 mm de longitud total. La tolerancia en la longitud de la varilla de compactación es de 4 mm. La varilla debe tener el borde de compactación en ambos extremos redondeados, con una punta semiesférica del mismo diámetro de la varilla.

Tabla 15. Requisitos para el diámetro de la varilla de compactación

Diámetro del cilindro o ancho de la viga (mm)	Diámetro de la varilla (mm)
< 150	10 ± 2
≥ 150	16 ± 2

Fuente: (INEN 1576, 2011)

- Mazo. Se debe utilizar un mazo con cabeza de caucho o cuero no tratado, con una masa de 0,6 kg ± 0,2 kg.
- Herramientas de colocación. Deben ser de un tamaño suficientemente grande para que cada cantidad de hormigón obtenida del recipiente en el que se tomó la muestra, sea representativa y lo suficientemente pequeña para que el hormigón no se derrame durante la colocación en el molde. Para la colocación del hormigón en el molde para cilindros la herramienta aceptable es un cucharón. Para la colocación del hormigón en el molde para vigas, se permite el uso de una pala o de un cucharón.
- Herramientas para el terminado. Deben ser una llana o una paleta



Figura 37. Equipo para elaboración de especímenes: cilindros y vigas.

4.4.4.2 Muestreo del hormigón.

Las muestras utilizadas para elaborar especímenes de ensayo bajo esta norma, deben ser obtenidas de acuerdo con la ASTM C172, a menos que haya sido aprobado o especificado un procedimiento alternativo.

4.4.4.3 Procedimiento.

Moldeo de cilindros. Seleccionar la varilla de compactación adecuada según la Tabla 15. De la Tabla 16 determinar el método de compactación. Si el método de compactación es por varillado, de la Tabla 17 determinar los requisitos para el moldeo. Mientras se coloca el hormigón en el molde, mover el cucharón alrededor del perímetro de la abertura del molde para asegurar una

distribución del hormigón con la mínima segregación. Cada capa de hormigón debe ser compactada según se requiera. Al colocar la última capa, adicionar una cantidad de hormigón para asegurar que, después de la compactación, el molde quede lleno.

Moldeo de vigas. Seleccionar la varilla de compactación adecuada según la Tabla 15. De la Tabla 16 determinar el método de compactación, a menos que otro método esté especificado. Si el método de compactación es por varillado, de la Tabla 17 determinar los requisitos para el moldeo. Determinar el número de golpes con la varilla por cada capa, uno por cada 14 cm² del área superficial de la viga. Cuando se utilice el cucharón o la pala, colocar el hormigón en el molde hasta la altura requerida para cada capa, colocar el hormigón de tal forma que esté uniformemente distribuido en cada capa con la mínima segregación. Cada capa debe ser compactada según se requiera. Al colocar la última capa, adicionar una cantidad de hormigón para asegurar que, después de la compactación, el molde quede lleno.

Tabla 16. Requisitos para determinar el método de compactación.

Asentamiento (mm)	Método de compactación
≥ 25	Varillado o vibración
< 25	Vibración

Fuente: (INEN 1576, 2011)

Tabla 17. Requisitos para el moldeo mediante varillado.

Tipo de espécimen y tamaño	Número de capas de aproximadamente igual altura	Número de golpes con la varilla por capa
Cilindros: Diámetro (mm)		
100	2	25
150	3	25
225	4	50
Vigas: Ancho (mm) De 150 a 200 > 200	2 3 o más capas de igual altura, cada una no debe exceder de 150 mm	1 golpe con la varilla por cada 14 cm ²

Fuente: (INEN 1576, 2011)

Varillado. Colocar el hormigón en el molde, en el número de capas requeridas de aproximadamente igual volumen. Compactar cada capa uniformemente sobre la sección transversal con la punta redondeada de la varilla, con el número de golpes requerido. Compactar la capa del fondo, penetrando la varilla en toda su profundidad, en la compactación de esta capa tener cuidado de no dañar el fondo del molde. Para cada capa superior, permitir que la varilla penetre toda la capa que está siendo compactada e ingrese a la capa inferior aproximadamente 25 mm. Luego de que cada capa ha sido compactada, golpear en el exterior del molde de 10 a 15 veces con el mazo.



Figura 39. Elaboración de especímenes para ensayo ASTM C31.

Terminado. Realizar todo el terminado con la mínima manipulación necesaria para producir una superficie plana, que esté nivelada con el borde superior del molde y que no tenga depresiones o proyecciones mayores de 3.3 mm.

Terminado en cilindros. Luego de la compactación, igualar y terminar la superficie superior con la varilla compactadora cuando la consistencia del hormigón lo permita o con una llana o paleta. Si se desea, colocar sobre la superficie del hormigón fresco una capa delgada de una pasta rígida de cemento hidráulico, permitiéndole que fragüe y cure con el espécimen.

Terminado en vigas. Luego de la compactación del hormigón, utilizar una llana o paleta para igualar la superficie superior con la tolerancia necesaria para producir una superficie plana y uniforme.

Identificación. Marcar los especímenes para su identificación y del hormigón que representan. Utilizar un método que no altere la superficie del hormigón, no se debe marcar en los elementos removibles del molde. Luego de

retirar el molde, marcar los especímenes de ensayo para mantener su identificación.



Figura 40. Identificación de especímenes: a- cilindros de hormigón convencional; b- cilindros de hormigón con escoria de acero; c- cilindros de hormigón con escoria y aditivo; d- vigas de hormigón convencional; e- vigas de hormigón con escoria; f- vigas de hormigón con escoria y aditivo

4.4.4.4 Curado.

Curado inicial. Inmediatamente después del moldeo y terminado, el espécimen debe ser almacenado por un período de hasta 48 horas a una temperatura entre 16°C y 27°C en un ambiente que prevenga la pérdida de humedad de los especímenes. Proteger todos los especímenes de los rayos directos del sol y de cualquier radiación calórica, si se utiliza.



Figura 41. Curado inicial de los especímenes: cilindros y vigas.

Curado final. a) Cilindros. Una vez concluido el curado inicial y dentro de 30 minutos después de remover los especímenes de los moldes, curarlos a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ manteniendo todo el tiempo sus superficies con agua libre, utilizando tanques de almacenamiento o cámaras de curado. b) Vigas. Deben ser curadas de la misma forma que los cilindros, a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ por lo menos 20 horas antes de su ensayo. Debe

prevenirse el secado de las superficies de la viga, desde la remoción del almacenamiento en agua, hasta el ensayo.



Figura 42. Curado final de especímenes: cilindros y vigas.

4.5 Ensayos del hormigón en su estado de endurecimiento.

Después de haber finalizado secuencialmente los tiempos de curado a los 4, 7, 14 y 28 días de los especímenes (cilindros y vigas) del hormigón convencional H.C, hormigón con escoria H.E y hormigón con escoria de acero y aditivo H.E.A se procede a realizar los ensayos del hormigón en su estado endurecido.

4.5.1 Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico. ASTM C 39.

Esta norma establece el método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico. Este método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros moldeados o núcleos de hormigón de cemento hidráulico a una

velocidad que se encuentra dentro de un rango definido hasta que ocurra la falla del espécimen. La resistencia a la compresión de un espécimen se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo para el área de la sección transversal del espécimen.

4.5.1.1 Equipos.

Máquina de ensayo, debe tener la suficiente capacidad y disponer de diferentes velocidades de carga. La máquina debe ser operada con energía eléctrica y debe aplicar la carga continuamente y de forma intermitente y sin producir impacto. Debe estar equipada con dos bloques de carga de acero con caras endurecidas. Las caras de apoyo de los bloques con diámetro de 150 mm o mayor no deben desviarse de la condición del plano por más de 0.02 mm a lo largo de los 150 mm.

4.5.1.2 Especímenes.

Los especímenes no deben ser ensayados si cualquier diámetro individual de un cilindro difiere de cualquier otro diámetro del mismo cilindro en más del 2%. Esto puede ocurrir cuando los moldes que son para un solo uso.

4.5.1.3 Procedimiento.

Se deben realizar los ensayos de compresión de especímenes curados en húmedo, tan pronto como sea posible luego de extraerlos del almacenamiento húmedo.

Los especímenes deben ser ensayados en condición húmeda. Se deben mantener húmedos utilizando cualquier método conveniente durante el período comprendido entre la remoción del almacenamiento húmedo y el ensayo.

Todos los especímenes de ensayo para una edad de ensayo dada, deben romperse dentro de las tolerancias de tiempo admisibles, señaladas en la Tabla 18:

Tabla 18. Tolerancia de tiempo admisible para el ensayo de especímenes.

Edad de ensayo	Tolerancia admisible
24 horas	± 0,5 h o 2,1%
3 días	2 horas o 2,8%
7 días	6 horas o 3,6%
28 días	20 horas o 3,0%
90 días	2 días o 2,2%

Fuente: (INEN 1573, 2010)

Colocación del espécimen. Colocar el bloque de carga plano (inferior), con su cara endurecida hacia arriba, sobre la mesa o platina de la máquina de ensayo directamente bajo del bloque de carga esférico (superior). Verificar el ajuste a cero y asentamiento del bloque.

Velocidad de carga. Aplicar la carga continuamente y sin impacto. La carga debe ser aplicada a una velocidad de movimiento correspondiente a una velocidad de esfuerzo sobre el espécimen de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s. Se debe mantener la velocidad de movimiento señalada al menos durante la última mitad de la fase de la carga esperada.

Aplicar la carga de compresión hasta que el indicador de carga muestre que está decreciendo constantemente y el espécimen muestre un patrón de fractura bien definido. El esquema de los modelos típicos de fractura se muestra en la Figura 43.

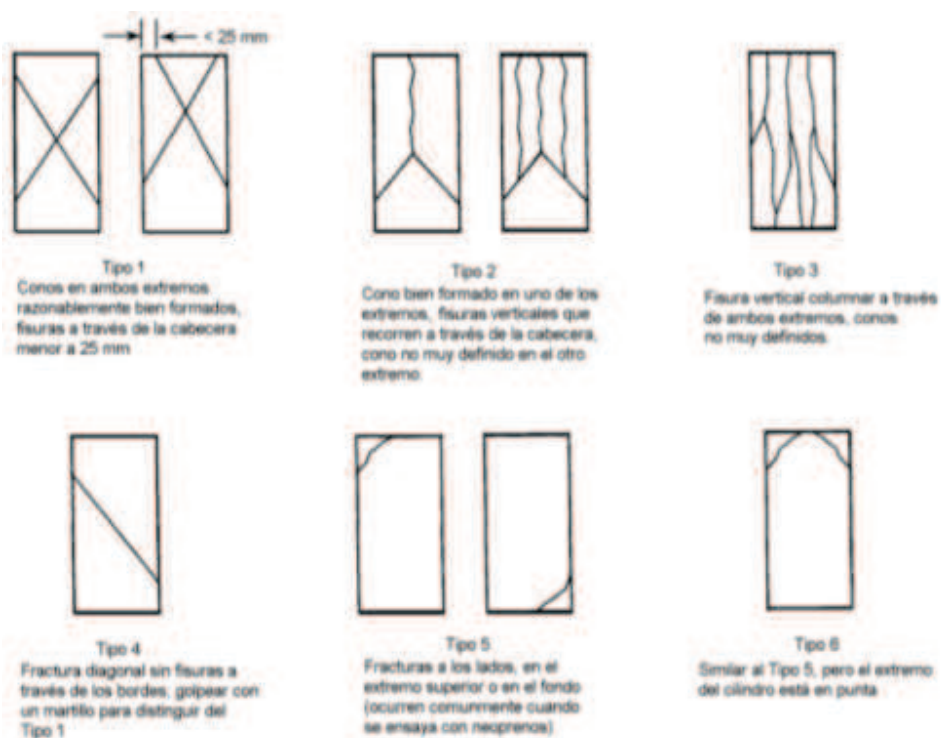


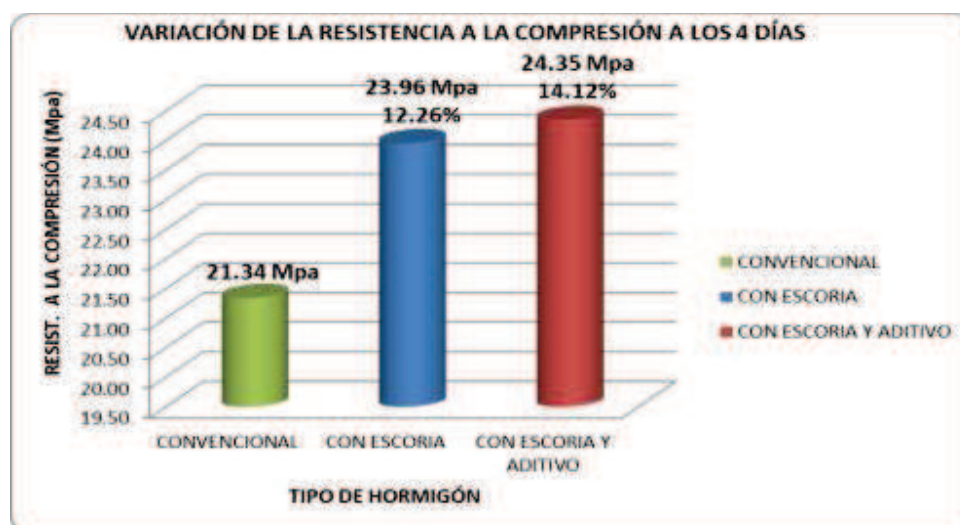
Figura 43. Esquema de los modelos típicos de fractura.

Fuente: (INEN 1573, 2010)

4.5.1.4 Resultados.

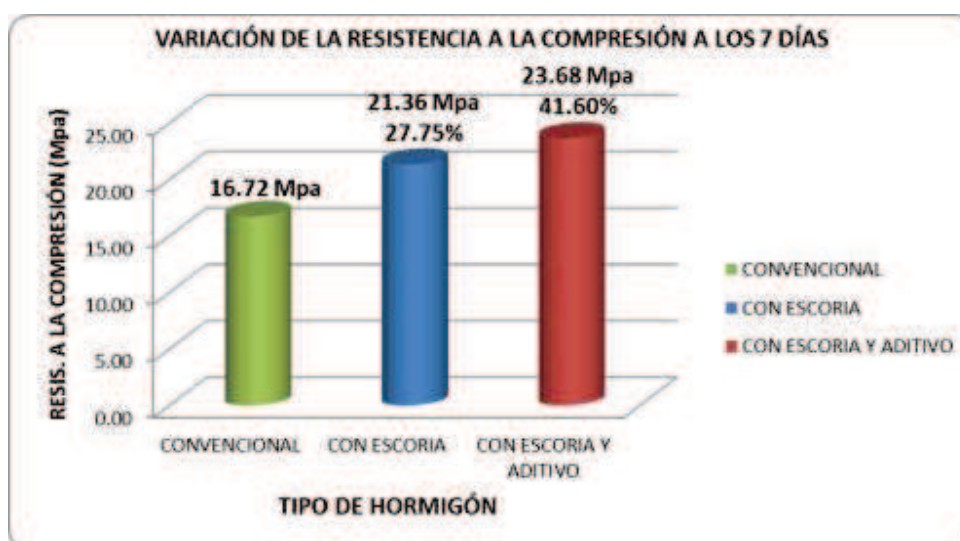
Cuadro 39. Resultados de la resistencia a la compresión del H.C, H.E, H.E.A a los 4 días (curado rápido).

Resistencia a la compresión estimada a los 4 días: 95% a 98% de 21 Mpa = 19.95 Mpa - 20.58 Mpa			
DESCRIPCIÓN	HORMIGÓN CONVENCIONAL	HORMIGÓN CON ESCORIA	HORMIGÓN CON ESCORIA Y ADITIVO
Probeta No.	1	1	1
Edad de ensayo (días)	4	4	4
Diámetro (cm)	15.11	15.27	15.15
Longitud (cm)	30.03	30.04	30.05
Área (cm ²)	179.32	183.13	180.27
Peso (kg)	12.21	14.52	14.36
Máxima carga obtenida (Kg)	38 264.00	43 870.00	43 900.00
Tipo de falla de la probeta	corte	corte	corte
Resistencia a la compresión (Kg/cm ²)	213.39	239.55	243.53
Resistencia a la compresión (Mpa)	21.34	23.96	24.35
Incremento de f'c (Mpa)	-	2.62	3.01
Incremento de f'c (%)	-	12.26	14.12



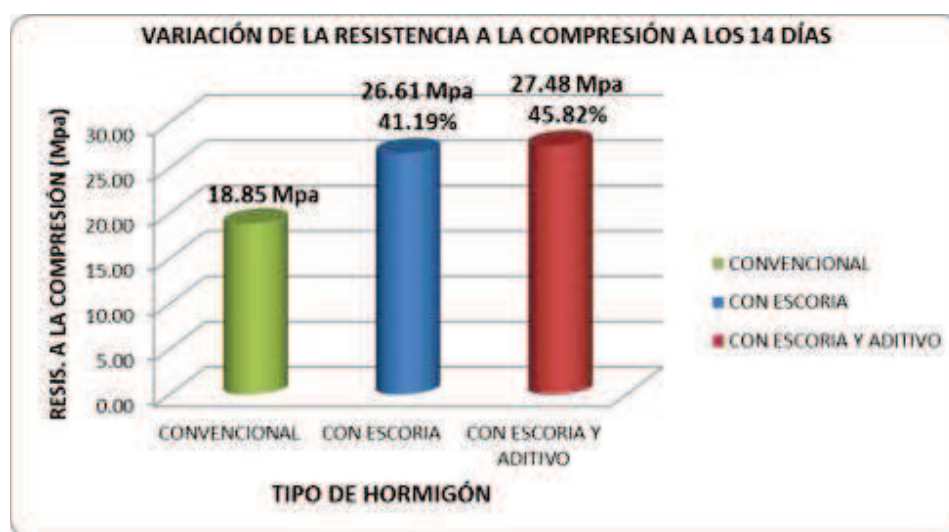
Cuadro 40. Resultados de la resistencia a la compresión del H.C, H.E, H.E.A a los 7 días.

Resistencia a la compresión estimada a los 7 días: 65% a 75% de 21 Mpa = 13.65 Mpa - 15.75 Mpa						
DESCRIPCIÓN	HORMIGÓN CONVENCIONAL		HORMIGÓN CON ESCORIA		HORMIGÓN CON ESCORIA Y ADITIVO	
Probeta No.	2	3	2	3	2	3
Edad de ensayo (días)	7	7	7	7	7	7
Diámetro (cm)	15.17	15.03	15.27	15.07	15.07	15.23
Longitud (cm)	30.01	30.05	30.03	30.01	30.06	30.04
Área (cm ²)	180.74	177.42	183.13	178.37	178.37	182.18
Peso (kg)	12.45	12.98	14.63	14.14	14.56	14.61
Máxima carga obtenida (Kg)	29 042.00	30 824.00	42 054.00	35 240.00	43 800.00	41 532.00
Tipo de falla de la probeta	corte	corte	corte	corte	corte	corte
f'c (Kg/cm ²)	160.68	173.73	229.64	197.57	245.56	227.98
f'c (Mpa)	16.07	17.37	22.96	19.76	24.56	22.80
f'c promedio (Mpa)	16.72		21.36		23.68	
Incremento de f'c (Mpa)	-		4.64		6.96	
Incremento de f'c (%)	-		27.75		41.60	



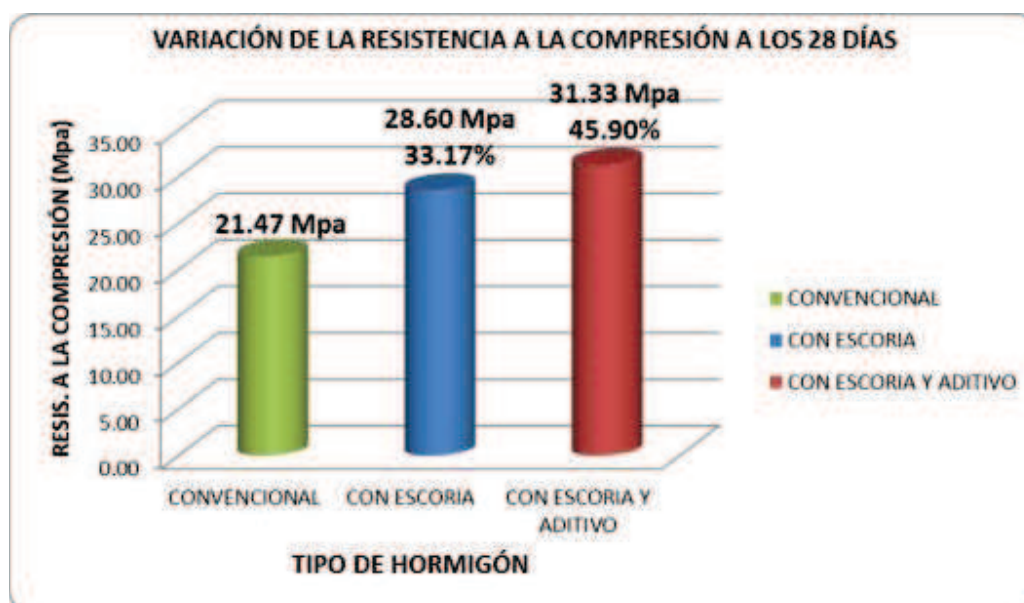
Cuadro 41. Resultados de la resistencia a la compresión del H.C, H.E, H.E.A a los 14 días.

Resistencia a la compresión estimada a los 14 días: 80% a 85% de 21 Mpa = 15.75 Mpa - 17.85 Mpa						
DESCRIPCIÓN	HORMIGÓN CONVENCIONAL		HORMIGÓN CON ESCORIA		HORMIGÓN CON ESCORIA Y ADITIVO	
Probeta No.	4	5	4	5	4	5
Edad de ensayo (días)	14	14	14	14	14	14
Diámetro (cm)	15.13	15.32	15.13	15.17	15.38	15.20
Longitud (cm)	30.01	30.04	30.05	30.06	30.04	30.01
Área (cm ²)	179.79	184.33	179.79	180.74	185.78	181.46
Peso (kg)	12.20	12.78	14.31	14.59	14.94	14.40
Máxima carga obtenida (Kg)	33 474.00	35 166.00	46 826.00	49 124.00	52 239.00	48 719.00
Tipo de falla de la probeta	corte	corte	corte	corte	corte	corte
f'c (Kg/cm ²)	186.18	190.77	260.45	271.79	281.19	268.49
f'c (Mpa)	18.62	19.08	26.04	27.18	28.12	26.85
f'c promedio (Mpa)	18.85		26.61		27.48	
Incremento de f'c (Mpa)	-		7.76		8.64	
Incremento de f'c (%)	-		41.19		45.82	



Cuadro 42. Resultados de la resistencia a la compresión del H.C, H.E, H.E.A a los 28 días.

Resistencia a la compresión a los 28 días: 100% de 21 Mpa.			
DESCRIPCIÓN	HORMIGÓN CONVENCIONAL	HORMIGÓN CON ESCORIA	HORMIGÓN CON ESCORIA Y ADITIVO
Probeta No.	6	6	6
Edad de ensayo (días)	28	28	28
Diámetro (cm)	15.2	15.23	15.28
Longitud (cm)	30.05	30.05	30.03
Área (cm ²)	181.46	182.18	183.37
Peso (kg)	12.80	14.60	14.84
Máxima carga obtenida (Kg)	38 964.00	52 094.00	57 447.00
Tipo de falla de la probeta	corte	corte	corte
f'c (Kg/cm ²)	214.73	285.96	313.28
f'c (Mpa)	21.47	28.60	31.33
Incremento de f'c (Mpa)	-	7.12	9.86
Incremento de f'c (%)	-	33.17	45.90



La fractura típica que se presentó en los todos los cilindros de hormigón al realizar el ensayo de compresión es por corte en los extremos superiores de las probetas; esto ocurre cuando se ensaya con cabezales con almohadillas no adherentes (neoprenos).

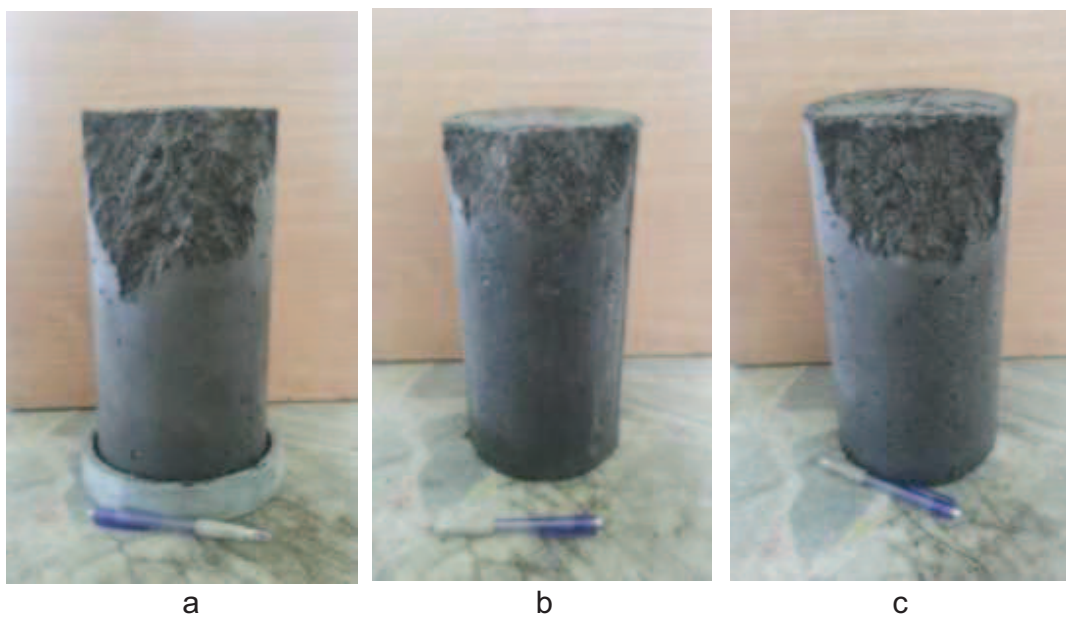


Figura 44. Fracturas de probetas cilíndricas: a- hormigón convencional; b- hormigón con escoria de acero; c- hormigón con escoria de acero y aditivo.

4.5.2 Determinación del módulo de elasticidad del concreto en compresión. ASTM C 469.

El módulo de elasticidad, definido por la ecuación $E_c = \text{esfuerzo} / \text{deformación}$ es una medida de la rigidez, o sea la resistencia del hormigón a la deformación.

El hormigón no es un material verdaderamente elástico, pero el hormigón que ha endurecido por completo y se ha cargado en forma moderada tiene

una curva de esfuerzo de compresión- deformación que, en esencia, es una recta dentro del rango de los esfuerzos usuales de trabajo.

El módulo de elasticidad es aplicable dentro de los rangos de esfuerzos de trabajo acostumbrados (0 a 40% de la resistencia última del concreto), son usados para el dimensionamiento de elementos reforzados o no reforzados, para establecer la cantidad de refuerzo y para calcular los esfuerzos para las deformaciones unitarias observadas.

4.5.2.1 Equipo.

- Máquina de ensayo. Usar una máquina de ensayo capaz de aplicar una carga a la velocidad y a la magnitud indicadas en el procedimiento. La máquina de ensayo debe conformarse por el cabezal esférico y los bloques de apoyo.
- Compresómetro. Para determinar el módulo de elasticidad usar un dispositivo sensor adherido o no adherido que mida con una aproximación de 5 millonésimas, la deformación promedio en dos líneas de base diametralmente opuestas, cada una paralela al eje axial y centrada cerca de la mitad de la altura del espécimen.



Figura 45. Ensayo para determinar el módulo de elasticidad

4.5.2.2 Especímenes de ensayo.

Especímenes Cilíndricos Moldeados. Moldear los cilindros de acuerdo con los requerimientos para la elaboración de especímenes ensayados a compresión en descritos en la norma ASTM C 31. Los especímenes deben someterse a las condiciones de curado normalizado especificadas y ser ensayados a la edad para la cual se desea la información del módulo de elasticidad. Los especímenes se deben ensayar una hora después de ser removidos del tanque de curado. Los especímenes removidos del tanque de curado para su ensayo se deben mantener húmedos, cubriéndolos con una lona mojada durante el intervalo de tiempo entre su remoción del curado y la realización del ensayo.

4.5.2.3 Procedimiento.

Mantener la temperatura, y la humedad del ambiente lo más constantes que sea posible, durante el ensayo. Registrar cualquier fluctuación inusual de temperatura y de humedad en el informe.

Usar una pareja de los especímenes de ensayo, para determinar la resistencia a compresión de acuerdo con el método de ensayo ASTM C 39, previo a realizar el ensayo del módulo de elasticidad.

Colocar el espécimen de ensayo, con el equipo de medición de deformación instalado, en la platina o bloque de apoyo inferior de la máquina de ensayo. Cuidadosamente alinear el eje del espécimen con el centro de la rótula del cabezal superior de apoyo. A medida que el bloque superior de apoyo se lleva lentamente a asentarse sobre el espécimen, rote la parte móvil del bloque suavemente hasta que se obtenga un apoyo uniforme.

Durante la primera carga que es preliminar para el ajuste de los deformímetros, observar el funcionamiento de los mismos y corregir cualquier comportamiento inusual antes de las siguientes cargas. Obtenga cada conjunto de lecturas de la siguiente manera: Aplicar la carga continuamente y sin impactos.

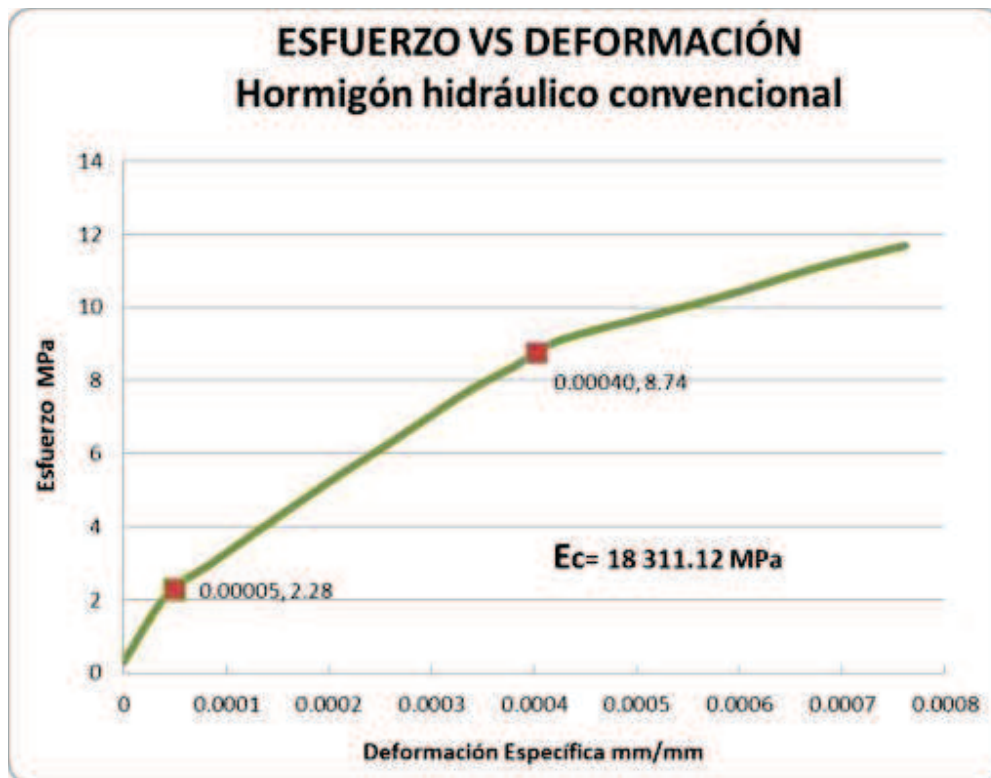
Ajustar la máquina de ensayo del tipo de tornillos de manera que el cabezal móvil se mueva a una velocidad aproximada de 1.25 mm (0.05 pulg.)/min cuando la máquina está corriendo libre. En máquinas que operan hidráulicamente, aplicar la carga a una velocidad constante dentro de un rango de 241 +/- 34 Kpa (35 +/- 5 psi)/s. Registrar sin interrupción del ensayo, la carga aplicada y la deformación unitaria al punto cuando la deformación unitaria longitudinal es de 50 millonésimas y al punto cuando la carga aplicada es igual al 40% de la carga última.

4.5.2.4 Resultados.

Cuadro 43. Resultado del módulo de elasticidad del hormigón hidráulico convencional.

DATOS DEL CILINDRO			CÁLCULOS		
Peso:	12.10	kg	S1	2.28	Mpa
Diámetro:	15.07	cm	S2	8.74	Mpa
Longitud:	30.03	cm	ϵ_1	0.00005	mm/mm
Área:	178.37	cm ²	ϵ_2	0.000402	mm/mm
P máx a los 28 días	38 964.00	Kg	Módulo Elasticidad	18 311.12	Mpa
f'c a los 28 días	218.45	kg/cm ²			
f'c a los 28 días	21.84	Mpa			
40%(f'c):	8.74	Mpa			

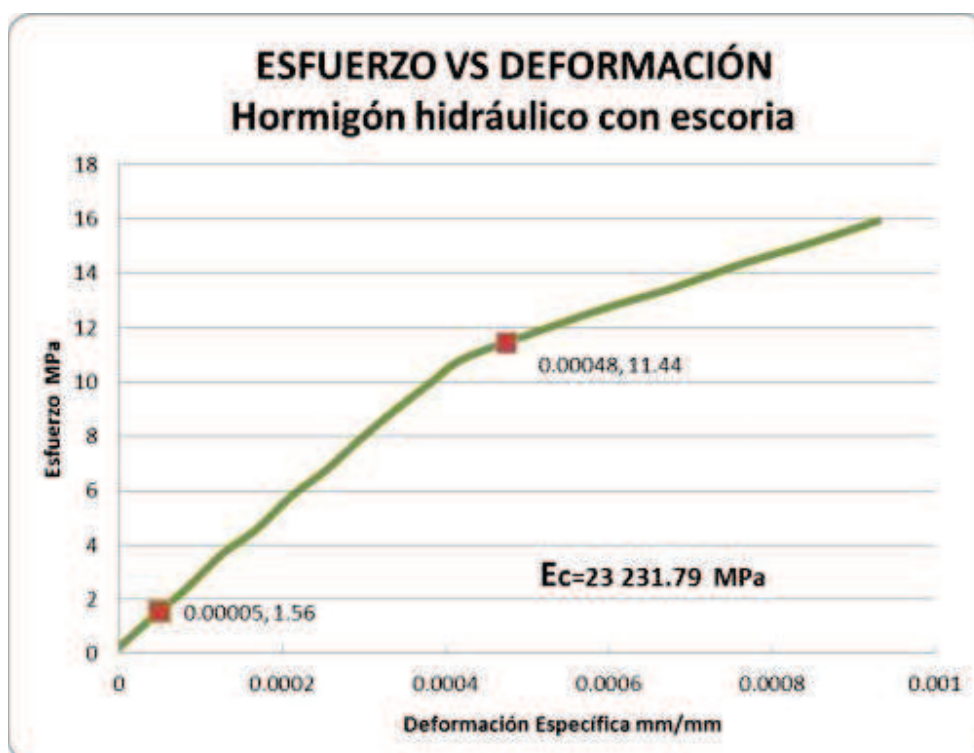
DEFORMACIÓN	Carga	Esfuerzo	Deformaciones	ϵ
1X10 ⁻⁴ "	KG	Mpa	mm	mm / mm
0	533.00	0.30	0	0.00000
5	3 800.00	2.13	0.01270	0.00004
10	5 300.00	2.97	0.02540	0.00008
15	6 790.00	3.81	0.03810	0.00013
20	8 250.00	4.63	0.05080	0.00017
25	9 690.00	5.43	0.06350	0.00021
30	11 030.00	6.18	0.07620	0.00025
35	12 430.00	6.97	0.08890	0.00030
40	13 820.00	7.75	0.10160	0.00034
45	14 950.00	8.38	0.11430	0.00038
50	16 180.00	9.07	0.12700	0.00042
60	17 350.00	9.73	0.15240	0.00051
70	18 490.00	10.37	0.17780	0.00059
80	19 790.00	11.10	0.20320	0.00068
90	20 840.00	11.68	0.22860	0.00076



Cuadro 44. Resultado del módulo de elasticidad del hormigón hidráulico con escoria de acero.

DATOS DEL CILINDRO			CÁLCULOS		
Peso:	14.72	kg	S1	1.56	Mpa
Diámetro:	15.23	cm	S2	11.44	Mpa
Longitud:	30.03	cm	ϵ_1	0.00005	mm/mm
Área:	182.18	cm ²	ϵ_2	0.000402	mm/mm
P máx a los 28 días	52 094.00	Kg	Módulo Elasticidad	18 311.12	Mpa
f'c a los 28 días	285.96	kg/cm ²			
f'c a los 28 días	28.60	Mpa			
40%(f'c):	11.44	Mpa			

DEFORMACIÓN	Carga	Esfuerzo	Deformaciones	ϵ
1×10^{-4} "	KG	Mpa	mm	mm / mm
0	409.00	0.22	0	0.00000
5	2 490.00	1.37	0.01270	0.00004
10	4 460.00	2.45	0.02540	0.00008
15	6 690.00	3.67	0.03810	0.00013
20	8 350.00	4.58	0.05080	0.00017
25	10 570.00	5.80	0.06350	0.00021
30	12 290.00	6.75	0.07620	0.00025
35	14 390.00	7.90	0.08890	0.00030
40	16 320.00	8.96	0.10160	0.00034
45	18 095.00	9.93	0.11430	0.00038
50	19 790.00	10.86	0.12700	0.00042
60	21 490.00	11.80	0.15240	0.00051
70	23 095.00	12.68	0.17780	0.00059
80	24 480.00	13.44	0.20320	0.00068
90	26 090.00	14.32	0.22860	0.00076
100	27 490.00	15.09	0.25400	0.00085
110	29 020.00	15.93	0.27940	0.00093



Cuadro 45. Resultado del módulo de elasticidad del hormigón hidráulico con escoria de acero y aditivo.

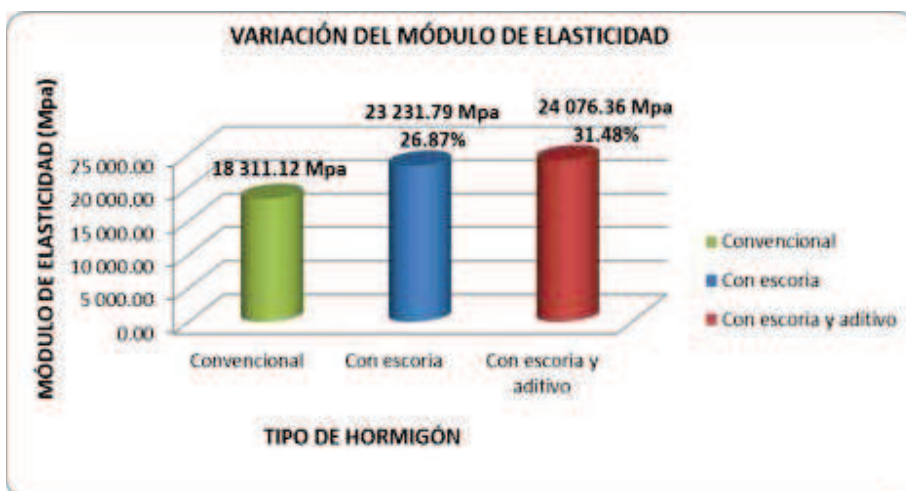
DATOS DEL CILINDRO			CÁLCULOS		
Peso:	14.74	kg	S1	1.56	Mpa
Diámetro:	15.37	cm	S2	11.44	Mpa
Longitud:	30.05	cm	ε1	0.00005	mm/mm
Área:	185.54	cm ²	ε2	0.000475	mm/mm
P máx a los 28 días	57 447.00	Kg	Módulo Elasticidad	23 231.79	Mpa
f'c a los 28 días	309.62	kg/cm ²			
f'c a los 28 días	30.96	Mpa			
40%(f'c):	12.38	Mpa			

DEFORMACIÓN	Carga	Esfuerzo	Deformaciones	ε
1X10 ⁻⁴ "	KG	Mpa	mm	mm / mm
0	698.00	0.38	0	0.00000
5	2 990.00	1.61	0.01270	0.00004
10	5 290.00	2.85	0.02540	0.00008
15	7 350.00	3.96	0.03810	0.00013
20	9 280.00	5.00	0.05080	0.00017
25	11 200.00	6.04	0.06350	0.00021
30	13 290.00	7.16	0.07620	0.00025
35	14 900.00	8.03	0.08890	0.00030
40	16 890.00	9.10	0.10160	0.00034
45	18 390.00	9.91	0.11430	0.00038
50	20 050.00	10.81	0.12700	0.00042
60	21 095.00	11.37	0.15240	0.00051
70	23 439.00	12.63	0.17780	0.00059
80	25 000.00	13.47	0.20320	0.00068
90	26 700.00	14.39	0.22860	0.00076
100	28 400.00	15.31	0.25400	0.00085
110	29 800.00	16.06	0.27940	0.00093



Cuadro 46. Resumen de resultados del módulo de elasticidad del H.C, H.E y H.E.A.

Descripción	Tipo de hormigón hidráulico		
	Convencional	Con escoria	Con escoria y aditivo
E_c (Mpa)	18 311.12	23 231.79	24 076.36
Incremento de E_c (Mpa)	-	4 920.68	5 765.24
Incremento de E_c (%)	-	26.87	31.48



4.5.3 Determinación de la resistencia a la flexión del hormigón (utilizando una viga simple con carga en los tercios). ASTM C 78.

Esta norma establece el método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión del hormigón mediante el uso de una viga simple apoyada en los extremos y cargada en los tercios de la luz libre. Los resultados se calculan y reportan como el módulo de rotura.

4.5.3.1 Equipo.

Aparatos de carga. El método de la carga en los tercios de la luz libre se utiliza para realizar ensayos de flexión del hormigón, empleando bloques de carga, los cuales aseguran que las fuerzas aplicadas a la viga sean perpendiculares a la cara del espécimen y aplicadas sin excentricidad.

Todos los aparatos para realizar ensayos de flexión al hormigón deben ser capaces de mantener constante la longitud de la luz libre especificada y las distancias entre los bloques de aplicación de carga y los bloques de apoyo dentro de ± 1.30 mm.

4.5.3.2 Especímenes de ensayo.

Los lados del espécimen deben formar ángulo recto con la parte superior e inferior. Todas las superficies deben estar lisas y libres de marcas, desportilladuras, agujeros o marcas de identificación impresas.

4.5.3.3 Procedimiento.

Los ensayos a flexión deben ser realizados tan pronto como sea posible luego de extraerlos del almacenamiento húmedo. Los especímenes con las superficies secas presentan una reducción en la resistencia a la flexión.

Cuando se utilizan especímenes moldeados, girar el espécimen de ensayo sobre un lado con respecto a su posición como fue moldeado y centrarlo en los bloques de apoyo. Centrar el sistema de carga respecto a la fuerza aplicada. Llevar los bloques de aplicación de carga, al contacto con la superficie del espécimen en los tercios de la luz libre y aplicar una carga de entre el 3% y el 6% de la carga final estimada.

Aplicar carga al espécimen continuamente y sin impacto. La carga debe ser aplicada a una velocidad constante hasta el punto de rotura. Aplicar la carga a una velocidad tal que aumente constantemente el esfuerzo máximo sobre la cara de tracción entre 0.86 MPa/min y 1.21 MPa/min, hasta que se produzca la rotura.

Si la fractura se produce en la superficie de tracción dentro del tercio medio de la luz libre, calcular el módulo de rotura de la siguiente manera:

$$R = PL/bd^2$$

Donde:

R= módulo de rotura, en MPa,

P= carga máxima aplicada, indicada por la máquina de ensayo, en N,

L= Luz libre, en mm,

b= promedio del ancho del espécimen, en la fractura, en mm,

d= promedio de la altura del espécimen, en la fractura, en mm.

Si la fractura se produce en la superficie de tracción fuera del tercio medio de la luz libre, pero no más allá del 5% de la luz libre, calcular el módulo de rotura de la siguiente manera:

$$R = 3Pa/bd^2$$

Donde:

a = distancia media entre la línea de fractura y el apoyo más cercano medido en la superficie de la tracción de la viga, en mm

Si la fractura se produce en la superficie de tracción fuera del tercio medio de la luz libre, en más de un 5% de la luz libre, desechar los resultados del ensayo.



Figura 46. Procedimiento para la determinación de la resistencia a la flexión.

4.5.3.4 Resultados.

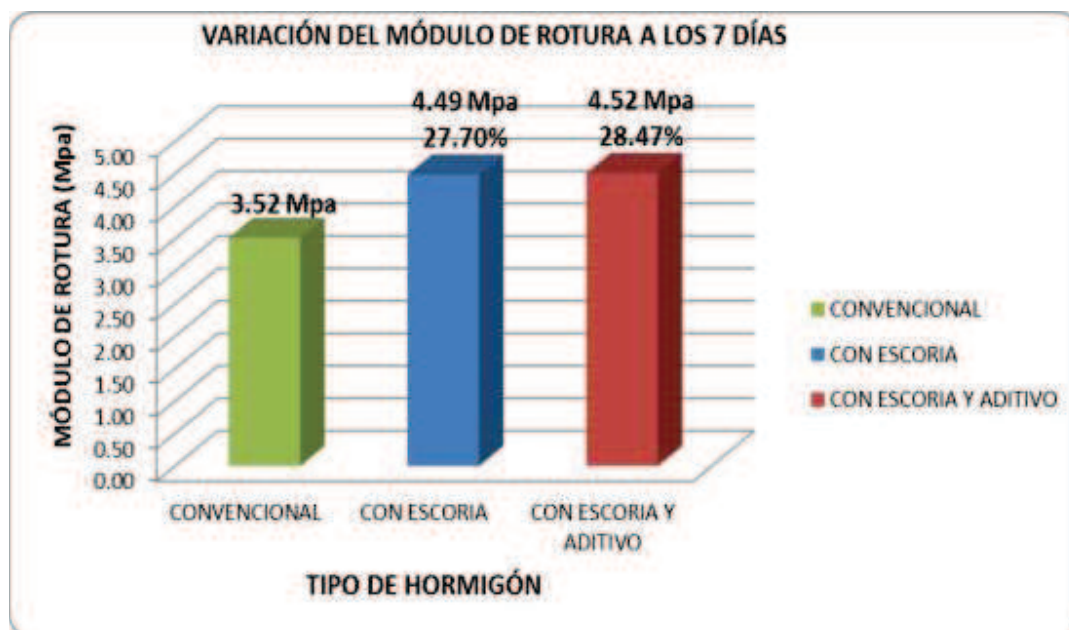
Las fracturas se produjeron en todos los casos dentro del tercio medio de la luz libre de las vigas como se puede ver en la Figura 47.



Figura 47. Fractura de vigas en el tercio medio de la luz libre de las mismas.

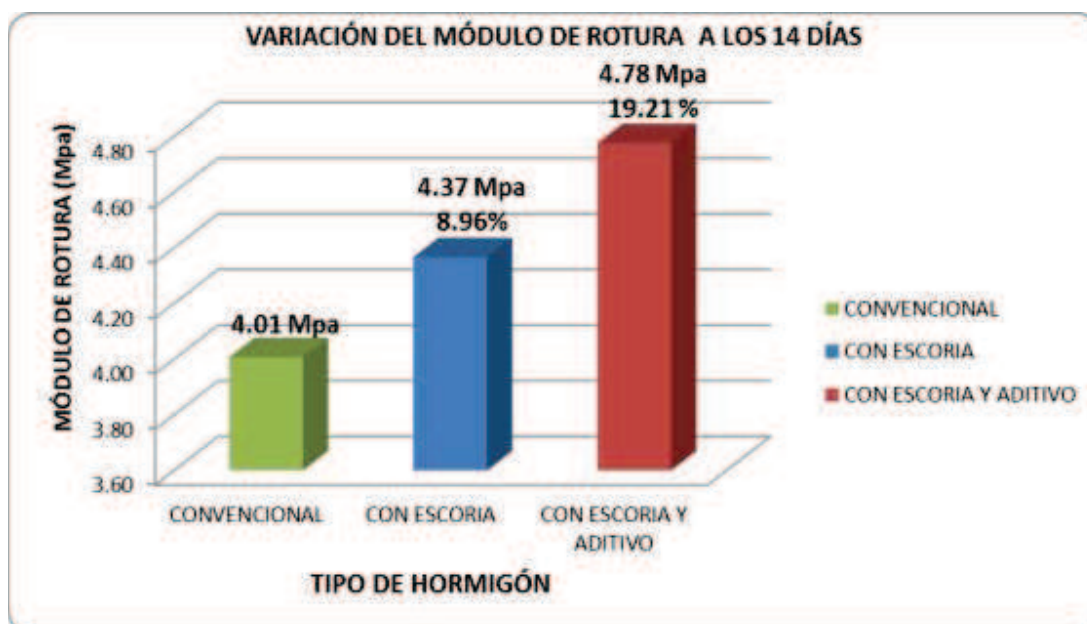
Cuadro 47. Resultados del módulo de rotura obtenidos a los 7 días.

DESCRIPCIÓN	HORMIGÓN CONVENCIONAL		HORMIGÓN CON ESCORIA		HORMIGÓN CON ESCORIA Y ADITIVO	
	1	2	1	2	1	2
Viga No.	1	2	1	2	1	2
Edad de ensayo (días)	7	7	7	7	7	7
Luz libre de la viga (mm)	532.70	532.70	531.70	532.70	531.70	533.00
Ancho del espécimen (mm)	154.50	154.50	152.17	154.67	156.33	153.00
Altura del espécimen (mm)	155.00	155.00	154.50	155.17	154.67	153.00
Carga máxima aplicada (N)	24 497.80	24 497.80	30 486.15	31 574.94	30 486.15	31 574.94
MR (Mpa)	3.52	3.52	4.46	4.52	4.33	4.70
MR promedio (Mpa)	3.52	3.52	4.49	4.49	4.52	4.52
Incremento de MR (Mpa)	-	-	0.97	0.97	1.00	1.00
Incremento de MR (%)	3.52	3.52	27.70	27.70	28.47	28.47



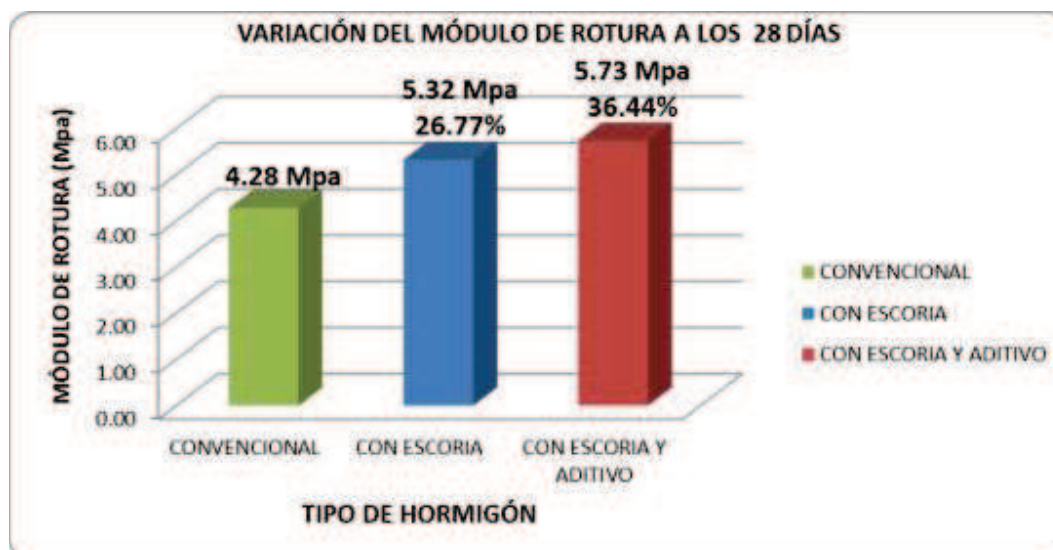
Cuadro 48. Resultados del módulo de rotura obtenidos a los 14 días.

DESCRIPCIÓN	HORMIGÓN CONVENCIONAL	HORMIGÓN CON ESCORIA	HORMIGÓN CON ESCORIA Y ADITIVO
Viga No.	2	3	3
Edad de ensayo (días)	14	14	14
Luz libre de la viga (mm)	533.00	532.00	531.70
Ancho del espécimen (mm)	154.37	154.00	152.30
Altura del espécimen (mm)	154.67	155.30	154.50
Carga máxima aplicada (N)	27 764.17	30 486.15	32 663.73
MR (Mpa)	4.01	4.37	4.78
Incremento de MR (Mpa)	-	0.36	0.77
Incremento de MR (%)	-	8.96	19.21



Cuadro 49. Resultados del módulo de rotura obtenidos a los 28 días.

DESCRIPCIÓN	HORMIGÓN CONVENCIONAL		HORMIGÓN CON ESCORIA		HORMIGÓN CON ESCORIA Y ADITIVO	
	4	5	5	6	5	6
Viga No.	4	5	5	6	5	6
Edad de ensayo (días)	28	28	28	28	28	28
Luz libre de la viga (mm)	528.00	529.00	530.30	533.30	531.70	532.00
Ancho del espécimen (mm)	153.30	154.80	152.70	153.30	154.00	154.00
Altura del espécimen (mm)	155.70	154.30	154.00	154.70	154.70	154.70
Carga máxima aplicada (N)	29 397.36	30 486.15	35 930.10	37 018.89	39 196.48	40 285.27
MR (Mpa)	4.18	4.38	5.26	5.38	5.65	5.82
MR promedio (Mpa)	4.28		5.32		5.73	
Incremento de MR (Mpa)	-		1.14		1.56	
Incremento de MR (%)	-		26.77		36.44	



4.5.4 Determinación de la resistencia a la tracción indirecta. ASTM C496

El ensayo tiene como objetivo determinar la resistencia a tracción indirecta de probetas cilíndricas sometiéndolas a una fuerza de compresión aplicada en una banda estrecha en toda su longitud, en consecuencia, el resultado de la fuerza de tracción ortogonal resultante origina que la probeta se rompa a tracción. Son ensayos mucho más sencillos que los directos y permiten una buena estimación del valor de la resistencia a tracción, por lo que son los más empleados.

4.5.4.1 Equipos y materiales.

- Máquina universal de 100 Tn,
- Listones diametrales de apoyo deben ser dos tiras de madera laminada de 3 mm de espesor y 25 mm de ancho aproximadamente.
- Bloques y placas de carga de acero con caras endurecidas con diámetro de 150 mm o mayor.
- Probeta cilíndrica de hormigón hidráulico de 15 cm de diámetro y 30 cm de longitud.



Figura 48. Ensayo de tracción indirecta.

4.5.4.2 Procedimiento.

El hormigón tiene que estar endurecido y curado con las condiciones normalizadas de laboratorio y romper las probetas a los 28 días, o al tiempo y circunstancias que se determinen en cada caso.

Antes de colocar la probeta en la máquina de ensayo se dibuja, en cada cara, una línea que marque un diámetro del mismo plano axial. Se trazan las generatrices que unen los extremos correspondientes a los diámetros marcados. Estas generatrices corresponden al plano de rotura.

Se mide la probeta en todas sus direcciones con precisión de 1 mm. Se elimina el posible exceso de humedad de la superficie y se coloca la probeta en el dispositivo de ensayo con la generatriz trazada sobre una banda de fibras prensadas de 10 mm de ancho, 4 mm de espesor y una longitud superior a la de la probeta.

Después se sitúa, sobre la generatriz superior opuesta otra banda idéntica a la descrita y sobre ésta una barra de sección rectangular mínima de 50 mm de anchura y de espesor igual o superior a la mitad de la diferencia entre la longitud de la probeta y la mayor dimensión del plato de la prensa.

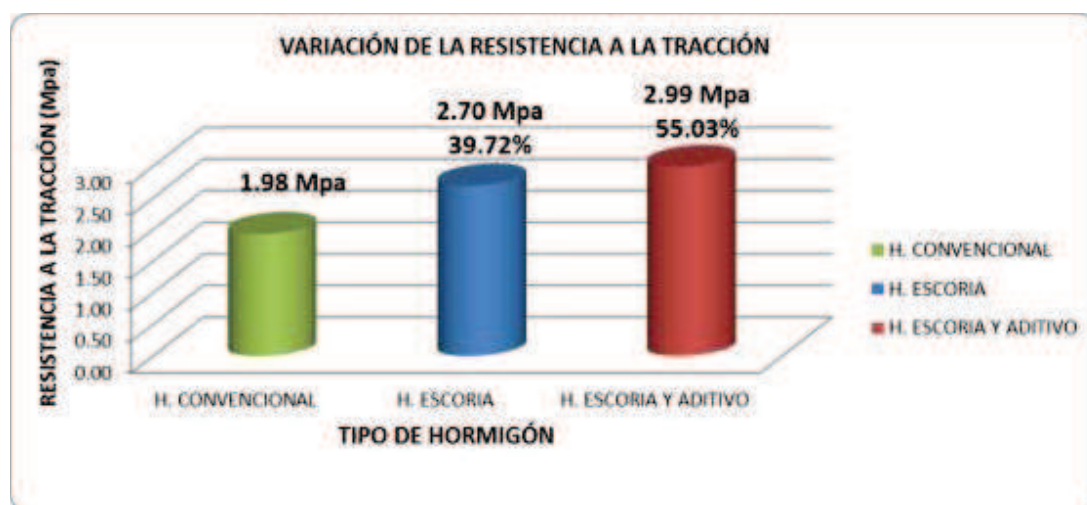
Se sitúa el dispositivo centrado en los platos de prensa, se aproximan los platos para poder fijar la posición del conjunto, sin aplicación de carga.

A continuación, con un incremento de presión constante de entre 4 y 6 Mpa/s, se procede a la rotura de la probeta, anotándose la carga total u obtenida. Una vez rota la probeta, se observa el aspecto del hormigón y se anota cualquier anomalía que se detecte.

4.5.4.3 Resultados.

Cuadro 50. Resultados de ensayo de tracción indirecta

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	HORMIGÓN CONVENCIONAL	HORMIGÓN ESCORIA	HORM. ESCORIA Y ADITIVO	UNIDADES
P	carga máxima aplicada	13 810.00	19 174.00	21 635.00	Kg
L	longitud del cilindro	30.04	30.05	30.04	cm
D	diámetro del cilindro	15.17	15.07	15.33	cm
RT	resist. a la tracción	19.29	26.95	29.91	kg/cm ²
		1.93	2.7	2.99	Mpa
Incremento de RT (Mpa)		-	0.77	1.06	Mpa
Incremento de RT (%)		-	39.72	55.03	%



La resistencia a la tracción del hormigón hidráulico con escoria de acero incrementa con respecto al hormigón convencional. "En caso de no poder realizarse este ensayo, la resistencia a la tracción puede tomarse como aproximadamente como el 10% de la resistencia a la compresión" (Rivera, 2000).

4.5.5 Análisis del hormigón producido con respecto a la Norma Ecuatoriana de la construcción vigente (NEC-11).

Según el NEC-11 los ensayos del hormigón recién mezclado y los rangos de aceptación deben hacerse de acuerdo a las normas INEN, las cuales son basadas en las normas ASTM, con estas últimas se ha venido trabajando en el proyecto, por ende el hormigón con escoria y el hormigón con escoria y aditivo cumplen con los requisitos del NEC-11, a continuación se presenta el cuadro comparativo.

Cuadro 51. Análisis del hormigón producido con respecto al NEC-11.

NEC-SE-HA -ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO				
DESCRIPCIÓN	REQUISITO	H. CON ESCORIA	H. ESCORIA Y ADITIVO	COMPARATIVO
Valor mínimo de $f'c$ del hormigón normal	21.00 Mpa	30. 51 Mpa	33.82 Mpa	ok
Valor máximo de $f'c$ del hormigón normal	35.00 Mpa	30. 51 Mpa	33.82 Mpa	ok
Asentamiento	50 mm \pm 25 mm	40.00 mm	40.00 mm	ok
Temperatura del hormigón en estado fresco	mín 13°C - máx 32°C	23.50°	23.10°C	ok

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Conclusiones.

- La escoria de acero es 1.37 veces más pesada que el agregado fino natural (arena), consecuentemente el hormigón hidráulico producido con dicha escoria es 13.92% más pesado que el hormigón hidráulico convencional; debido a ello se proyectó que el hormigón con escoria de acero es de gran utilidad para fundir elementos estructurales sobre piso, entiéndase por ello las cimentaciones comunes de edificaciones, losas para: bases de tanques de crudo, power control room, manifolds, antenas de telecomunicaciones, bombas y tanques de agua, etc. Losas en general en el nivel 0+00.
- La escoria de acero es porosa, no obstante el agregado fino natural presenta un mayor porcentaje de absorción (2.54%) que la escoria de acero (1.73%), debido a esto el hormigón con escoria de acero requiere de una cantidad un poco menor de agua de mezcla que el hormigón convencional
- El hormigón con escoria de acero presenta un incremento de resistencia a la compresión de 33.17% de la resistencia de diseño.

- El hormigón con escoria de acero presenta un incremento de resistencia a la flexión de 26.77% de la resistencia a la flexión de diseño.
- El hormigón con escoria de acero presenta un incremento en su módulo de elasticidad de 26.87% en comparación con el resultado del hormigón convencional.
- El hormigón con escoria de acero presenta un incremento de la resistencia a la tracción de 39.72% en comparación con el resultado del hormigón convencional.
- El hormigón hidráulico con escoria de acero cumple con los parámetros de asentamiento, temperatura, trabajabilidad estipuladas en las normas INEN, NEC-11, etc.
- La escoria de acero sí puede sustituir al agregado fino en la producción de hormigón hidráulico puesto que cumple con los parámetros para árido fino establecidas en las normas INEN y NEVI-12.

5.2 Recomendaciones.

- Se debería efectuar un estudio para determinar el grado de oxidación de la escoria de acero embebida en el hormigón hidráulico en función del tiempo y dar soluciones a las patologías que se presentaren conjuntamente a esta.

- Sería conveniente hacer un estudio en el país respecto al diseño de pavimentos rígidos con escoria de acero debido que en este campo no se necesita un hormigón liviano como en el caso de edificaciones.
- Se recomienda realizar una investigación acerca de la reacción álcali-escoria de acero del hormigón hidráulico con escoria de acero.
- Finalmente se sugiere continuar realizando investigaciones de la producción de hormigón con escoria de acero de tal forma que cumpla con las normas de construcción, medioambientales y salubridad pública con el fin de aprovechar los depósitos improductivos de la escoria de acero, por ende impulsar y fomentar el reciclaje.

5.3 Bibliografía.

ASTM C 143. (2014). DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO DE HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO.

(INPC), I. N. (2015). *Ensayo de Difracción de Rayos X de escorias de acero en INPC*. Ensayo Químico, Quito.

Proceso de obtención de la escoria de acero. (12 de Febrero de 2015). (J.

Cuásquer, & S. Altamirano, Recopiladores) Aloág, Pichincha, Ecuador.

ADELCA. (2015). *Adelca, acería del Ecuador*. Recuperado el 10 de Febrero de 2015, de Adelca C.A: <http://www.adelca.com/sitio/esp/corporativo.php>

AGRECONS, S.A. (2015). *Productos y aditivos para la construcción*. Recuperado el 2015 de Abril de 4, de <http://agrecons.com/productos.htm>

Albuja, I. L. (6 de Mayo de 2014). Escorias de acero. (J. Cuásquer, & S.

Altamirano, Recopiladores) Aloág, Pichincha, Ecuador.

Asocreto. (2000). *Tecnología y Propiedades*. Bogotá, Colombia.

ASTM C 1064. (2014). TEMPERATURA DEL HORMIGÓN HIDRÁULICO RECIÉN MEZCLADO .

ASTM C 128. (2010). Determinación de la densidad, densidad relativa (Gravedad específica), y aborción del agregado fino.

ASTM C 131. (2004). 3.2.5 Determinación del valor de la degradación del árido grueso mediante el uso de la Máquina de los Ángeles.

ASTM C 136. (2010). Análisis de tamizado para agregado fino y grueso.

ASTM C 187. (2004). Determinación de la consistencia normal del cemento hidráulico. Método Vicat.

ASTM C 188. (2010). Determinación de la densidad del cemento.

ASTM C 469. (2014). DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN HIDRÁULICO A COMPRESIÓN.

ASTM C 566. (2004). Método de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable en agregados por secado.

ASTM C 78. (s.f.). DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN (UTILIZANDO UNA VIGA CON CARGA EN LOS TERCIOS).

ASTM C172 . (2014). MUESTREO DEL HORMIGÓN HIDRÁULICO RECIÉN MEZCLADO.

ASTM C31. (2014). ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMINES PARA ENSAYO.

ASTM C496. (2011). Determinación de la resistencia a la tracción indirecta.

ASTMC 39. (2014). DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO.

Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Venezuela. (2003).

Revista Digital del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Venezuela. (F. A. Viani, Productor) Recuperado el 21 de Marzo de 2015, de Revista Digital del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias

de Venezuela:

http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_tec/ceniaphoy/articulos/n3/texto/fovalles.htm

Delgao, D. V. (19 de Diciembre de 2014). Análisis de los ensayos de difracción de rayos X y Lixiviación de las escorias de acero. (J. Cuásquer, & S. Altamirano, Recopiladores) Sangolquí, Pichincha, Ecuador.

GOOGLE EARTH. (20 de Marzo de 2014). *GOOGLE*. Obtenido de *GOOGLE EARTH*: <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>

H, E. (2009). *Notas de concretos*. Recuperado el 22 de Marzo de 2015, de Forma y Textura Superficial de las Partículas de un Agregado: <http://notasdeconcretos.blogspot.com/2011/04/forma-y-textura-superficial-de-las.html>

Herrera Barbosa, J. (2011). *Propiedades del Suelo*. Recuperado el 20 de Marzo de 2015, de <http://www.monografias.com/trabajos65/propiedades-suelo/propiedades-suelo.shtml>

Huerta O`Valle, J., Maldonado Madrigal, M. A., & Espinosa Villarreal, M. A. (27 de Abril de 2014). *Horno de arco eléctrico*. Recuperado el 20 de Marzo de 2015, de Horno de arco eléctrico: <http://es.slideshare.net/MarioAlberto2579/horno-de-arco-electrico>

INEN 156. (2009). Cemento Hidráulico. *Determinación de la densidad*.

INEN 157. (2009). Cemento hidráulico. *Determinación de la consistencia normal del cemento hidráulico. Método Vicat*. .

- INEN 1573. (Junio de 2010). DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. 6,10. Quito, Pichincha, Ecuador.
- INEN 1576. (2011). Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo. 2,5. Quito, Pichincha, Ecuador.
- INEN 158. (2009). Determinación del tiempo de fraguado del cemento hidráulico. Método Vicat. .
- INEN 872. (2011). Áridos para hormigón. *Requisitos*, 15-16. Ecuador.
- Jenkins, R., & Snyder, R. (1996). *Introduction to X-Ray Powder Diffractometry*.
- JIMÉNEZ, F. P., RECASENS, R. M., MARTÍNEZ, A., & VILLAR., E. G. (2007). *Universidad Politécnica de Cataluña*. Recuperado el 15 de Abril de 2015, de Departamento de Infraestructura del Transporte y Territorio : https://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/2833/1/miro_carreteras_5.pdf
- Lynn, W., & Pearson, M. (Mayo de 2000). *The Science Teacher*. Recuperado el 21 de Marzo de 2015, de The colour of soil: <http://www.envirothonpa.org/documents/munsellcharts.pdf>
- Metha, K. (2001). *La reducción del impacto ambiental del hormigón*. Recuperado el 10 de Mayo de 2014, de <http://www.icpa.org.ar/publico/files/mehtahor.pdf>
- Moreno, A. d., López, T. P., & Madrid, M. M. (Edits.). (2001). *Instituto mexicano de transporte*. Recuperado el 28 de Abril de 2015, de El fenómeno de la

corrosión en estructuras de concreto reforzado:

<http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt182.pdf>

NEC-11. (10 de Enero de 2015). Norma Ecuatoriana de la Construcción. Ecuador.

Nicolalde, S. (Abril de 2008). *Repositorio digital EPN*. Recuperado el 27 de Abril de 2014, de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/955>

Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12. (2012). *Ministerio de transporte y obras públicas*. Recuperado el 23 de Abril de 2015, de Requisitos de gradación de árido grueso y fino para hormigón hidráulico:

<http://www.obraspublicas.gob.ec/norma-ecuatoriana-vial-nevi-12/>

NTG. (2011). *Medición de la temperatura del concreto hidráulico recién mezclado*. Obtenido de

<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:FCeWakHKYqI>

[J:www.agies.org/biblioteca/normas-tecnicas-](http://www.agies.org/biblioteca/normas-tecnicas-guatemaltecas/concreto%3Fdownload%3D138:norma-ntg-41053-metodo-de-ensayo-medicion-de-la-temperatura-del-concreto-hidraulico-recien-mezclado-equivale)

[guatemaltecas/concreto%3Fdownload%3D138:norma-ntg-41053-](http://www.agies.org/biblioteca/normas-tecnicas-guatemaltecas/concreto%3Fdownload%3D138:norma-ntg-41053-metodo-de-ensayo-medicion-de-la-temperatura-del-concreto-hidraulico-recien-mezclado-equivale)

[metodo-de-ensayo-medicion-de-la-temperatura-del-concreto-hidraulico-](http://www.agies.org/biblioteca/normas-tecnicas-guatemaltecas/concreto%3Fdownload%3D138:norma-ntg-41053-metodo-de-ensayo-medicion-de-la-temperatura-del-concreto-hidraulico-recien-mezclado-equivale)

[recien-mezclado-equivale](http://www.agies.org/biblioteca/normas-tecnicas-guatemaltecas/concreto%3Fdownload%3D138:norma-ntg-41053-metodo-de-ensayo-medicion-de-la-temperatura-del-concreto-hidraulico-recien-mezclado-equivale)

Rivera, G. (2013). *Concreto Simple*. Cauca: S/E.

Scanferla, L., & Barreda, I. M. (2010). *Centro de Investigación Vial*. Recuperado

el 25 de Marzo de 2015, de Evaluación de los Angregados Localmente

Disponibles para ser Empleados en Hormigones de Pavimentos:

<http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp->

content/uploads/2011/10/Tesis2010_Lucas-Scanferla_Agregados-en-Hormigones-de-Pavimentos.pdf

Société Générale de Surveillance. (1995). *Procedimiento de Lixiviación Características De Toxicidad (TCLP)*. Recuperado el 22 de Marzo de 2015, de <http://www.sgs.cl/es-ES/Mining/Analytical-Services/Acid-Rock-Drainage-ARD/US-EPA-1311-Toxicity-Characteristic-Leaching-Procedure-TCLP.aspx>

Steeluniversity. (2013, Noviembre 15). *Steeluniversity*. Retrieved Febrero 20, 2015, from Steeluniversity:
<https://www.youtube.com/watch?v=5h4cx3wvu48>

Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente, TULAS. (s.f.). *Secretaría de Ambiente*. Recuperado el 9 de Marzo de 2015, de Secretaría de Ambiente:
http://www.quitoambiente.gob.ec/index.php?option=com_k2&view=item&id=125:texto-unificado-de-legislaci%2525C3%2525B3n-ambiental-secundaria-del-ministerio-de-ambiente-tulas&lang=es

World Steel Association. (2012). *World Steel Association*. Recuperado el 12 de Febrero de 2015, de The white book of steel:
<http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/press-release-downloads/2013/The-white-book-of-steel/document/The%20white%20book%20of%20steel.pdf>