

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE COMUNICACIÓN



**“ANÁLISIS DE CONCRETOS CON MICRO Y NANO
MATERIALES DE ALTA RESISTENCIA CON APLICACIÓN EN
PAVIMENTOS VIALES”**

Por:

BRINER DUCHEN GUERRERO

SEMESTRE II - 2019

TARIJA - BOLIVIA

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL
SARACHO”**

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE COMUNICACIÓN

**“ANÁLISIS DE CONCRETOS CON MICRO Y NANO
MATERIALES DE ALTA RESISTENCIA CON APLICACIÓN EN
PAVIMENTOS VIALES”**

Por:

BRINER DUCHEN GUERRERO

Proyecto de Grado presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil.

SEMESTRE II - 2019

TARIJA - BOLIVIA

.....
M.Sc. Ing. Ernesto R. Álvarez Gozalvez

**DECANO DE LA FACULTAD DE
CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

.....
M.Sc. Lic. Elizabeth Castro Figueroa

**VICEDECANA DE LA FACULTAD
DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

TRIBUNAL:

.....
Ing. Laura Karina Soto Salgado

.....
Ing. Trinidad Cinthia Baldiviezo Montalvo

.....
Ing. José Ricardo Arce Avendaño

El docente y tribunal evaluador del Proyecto de Ingeniería Civil no se solidarizan con los términos, la forma, los modos y las expresiones empleados en la elaboración del presente trabajo, siendo los mismos únicamente responsabilidad del autor.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado con todo mi amor a mi familia por brindarme su amor. Y principalmente a mi madre Mercedes Guerrero por todo el amor, cariño y apoyo incondicional

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida y fortaleza en los momentos difíciles.

A mi mamá por ser un ejemplo de lucha y perseverancia, por darme todas las herramientas para poder culminar esta etapa de mi vida.

A mis abuelos y tíos por su apoyo incondicional.

A todos mis amigos y amigas de la universidad por ser buenos compañeros. A todos los docentes que me brindaron sus conocimientos.

PENSAMIENTO

*“Nunca consideres el estudio como una obligación,
sino como una oportunidad para penetrar en el bello
y maravilloso mundo del saber”.*

Albert Einstein

ÍNDICE

CAPITULO I INTRODUCCIÓN

	Página
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	2
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.3.1. Situación problemática	3
1.3.2. Problema.....	3
1.4. OBJETIVOS	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. HIPÓTESIS.....	5
1.6. DEFINICIÓN DE VARIABLES	5
1.6.1. Variable independiente.....	5
1.6.2. Variable dependiente	5
1.7. UNIDADES DE ESTUDIO.....	5
1.7.1. Unidad de estudio	5
1.7.2. Población	5
1.7.3. Muestra	5
1.7.4. Muestreo	6
1.8. MÉTODO Y TÉCNICA EMPLEADA.....	6
1.8.1. Método.....	6
1.8.2. Técnica.....	6
1.9. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	7
1.9.1. Análisis e interpretación de la información.....	7
1.10. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	7

CAPITULO II

ASPECTOS GENERALES DEL CONCRETO EN LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS

	Página
2.1. PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	9
2.1.1. Componentes de los pavimentos rígidos	10
2.1.2. Esfuerzos en pavimentos rígidos	11
2.1.2.1. Por efectos de las cargas	11
2.1.2.2. Por efectos de temperatura.....	12
2.2. EL CONCRETO	13
2.2.1. Funciones de los componentes	14
2.2.1.1. Funciones de la pasta	14
2.2.1.2. Funciones de los agregados	14
2.2.2. Ventajas del concreto	14
2.2.3. Principales propiedades del concreto hidráulico para pavimentos rígidos.....	15
2.2.3.1. Trabajabilidad del hormigón en los pavimentos.....	15
2.2.3.1.1. Método del Cono de Abrams	16
2.2.3.1.2. Método de la esfera de Kelly	17
2.2.3.1.3. Factores que influyen en la trabajabilidad del concreto.....	18
2.2.3.1.4. Asentamientos según el tipo de obra.....	19
2.2.3.2. Resistencia a compresión.....	20
2.2.3.2.1. Rotura de probetas cilíndricas a compresión	21
2.2.3.2.2. Clasificación del concreto según su resistencia a compresión.....	22
2.2.3.2.3. Factores que influyen en la resistencia a compresión	24
2.2.3.3. Resistencia a flexión	27
2.2.3.3.1. Rotura de probetas prismáticas a flexión	27
2.2.3.3.2. Importancia de la resistencia a flexión.....	30
2.2.3.3.3. Problemas que afectan la resistencia a flexión.....	31
2.2.3.4. Otras propiedades	32
2.2.4. Especificaciones de resistencias en los pavimentos rígidos	33
2.2.4.1. Resistencia a compresión en los pavimentos	33
2.2.4.2. Resistencia a flexión en los pavimentos	35

2.3. CEMENTO PORTLAND	36
2.3.1. Materias primas y fabricación	37
2.3.2. Composición química del cemento	39
2.3.3. Tipos de cementos	39
2.3.4. Propiedades del cemento portland.....	40
2.3.4.1. Hidratación y calor de hidratación.....	40
2.3.4.2.- Peso específico	41
2.3.4.3. Superficie específica o finura	41
2.3.4.4. Consistencia normal.....	41
2.3.4.5. Tiempo de fraguado.....	42
2.3.4.6. Resistencia	42
2.3.5. Almacenamiento en obra.....	43
2.3.6. Calidad del cemento	43
2.4. EL AGUA	44
2.4.1. El agua en el concreto.....	45
2.4.2. Función característica del agua de mezclado	45
2.4.3. Función y característica del agua de curado.....	46
2.5. AGREGADOS	46
2.5.1. Agregado fino.....	47
2.5.1.1. Requisitos de uso	47
2.5.1.2. Granulometría (límites según la norma ASTM C33)	48
2.5.2. Agregado grueso.....	49
2.5.2.1. Clasificación	49
2.5.2.2. Requisito de uso.....	49
2.5.2.3. Granulometría (límites según la norma ASTM C33)	50
2.6. CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS.....	51
2.6.1. Módulo de Finura (M.F.).....	51
2.6.2. Tamaño Máximo (T.M.) y Tamaño Máximo Nominal (T.M.N.).....	52
2.6.3. Densidad	52
2.6.4. Porosidad	52
2.6.5. Absorción y humedad de la superficie	53
2.6.6. Peso Unitario (P.U.)	53

2.6.7. Resistencia a la abrasión.....	54
2.6.8. Equivalente de arena.....	55
2.7. MICRO Y NANO MATERIALES	55
2.7.1. Características.....	56
2.7.2. Micro y nano materiales en el concreto.....	56
2.8. EL GRAFITO.....	57
2.8.1. Características y usos	58
2.8.2. El grafito en Bolivia	59
2.8.3. El grafito en el concreto	60
2.9. LIMADURAS DE HIERRO FUNDIDO.....	61
2.9.1. Características y usos	61
2.9.2. Limaduras de hierro fundido en Bolivia.....	62
2.9.3. Limaduras de hierro fundido en el concreto.....	63
2.10. CONSIDERACIONES EN LOS PORCENTAJES DE ADICIÓN	63

CAPITULO III

CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS Y LOS ADITIVOS

	Página
3.1. PROCEDENCIA DE LOS MATERIALES.....	67
3.1.1. Agregados pétreos	67
3.1.2. Limaduras de hierro fundido	69
3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....	70
3.2.1. Agregado fino.....	70
3.2.1.1. Tamaño Máximo (T.M.).....	70
3.2.1.2. Tamaño Máximo Nominal (T.M.N.)	70
3.2.1.3. Porcentaje de finos (ASTM C117, AASHTO T11).....	70
3.2.1.4. Contenido de humedad por secado (ASTM C566).....	71
3.2.1.5. Granulometría y módulo de fineza (ASTM C136, AASHTO T27)	71
3.2.1.6. Peso unitario del agregado fino (ASTM C29, ASTM E30)	73
3.2.1.7. Peso específico y absorción del agregado fino (ASTM C128).....	75
3.2.1.8. Equivalente de arena (ASTM D2419, AASHTO T176).....	78

3.2.2. Agregado grueso.....	80
3.2.2.1. Tamaño Máximo (T.M.).....	80
3.2.2.2. Tamaño Máximo Nominal (T.M.N.)	80
3.2.2.3. Contenido de humedad por secado (ASTM C566).....	80
3.2.2.4. Granulometría y módulo de fineza (ASTM C136, AASHTO T27)	80
3.2.2.5. Peso unitario del agregado grueso (ASTM C29, ASTM E30)	82
3.2.2.6. Peso específico y absorción del agregado grueso (ASTM C127)	85
3.2.2.7. Resistencia a la abrasión (ASTM C131, AASHTO T96).....	86
3.2.3. Cemento.....	88
3.2.3.1. Peso específico (ASTM C188, AASHTO T133)	88
3.2.3.2. Finura del cemento.....	90
3.2.4. Grafito.....	90
3.2.4.1. Material fino que pasa el tamiz N°200 (ASTM C117, AASHTO T11)	90
3.2.5. Limaduras de hierro fundido	91
3.2.5.1. Material fino que pasa el tamiz N°200 (ASTM C117, AASHTO T11)	91

CAPITULO IV

DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO, ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

	Página
4.1. DISEÑO DE LA MEZCLA DE HORMIGÓN PARA PAVIMENTO	93
4.1.1. Dosificación del hormigón ACI-211	93
4.1.1.1. Selección del asentamiento.....	94
4.1.1.2. Selección del tamaño máximo	95
4.1.1.3. Estimación del contenido del agua de mezclado	96
4.1.1.4. Selección de la relación agua cemento	97
4.1.1.5. Selección del contenido de cemento.....	97
4.1.1.6. Selección del volumen óptimo de agregado grueso.....	98
4.1.1.7. Estimación del contenido de agregado fino	99
4.1.1.8. Ajuste por humedad.....	99
4.1.2. Proporciones optimas definidas de la mezcla de ensaye	99

4.1.3. Elaboración y curado de las muestras de hormigón	101
4.1.3.1. Elaboración de la mezcla, probetas cilíndricas y vigas de prueba	101
4.1.3.1.1. Preparación de los materiales	101
4.1.3.1.2. Pesaje de los materiales	103
4.1.3.1.3. Mezclado del concreto	103
4.1.3.1.4. Consistencia de la mezcla de concreto	106
4.1.3.1.5. Número de probetas y vigas de prueba	109
4.1.3.1.6. Vaciado de probetas cilíndricas	109
4.1.3.1.7. Vaciado de probetas prismáticas (vigas)	112
4.1.3.2. Curado de probetas cilíndricas y vigas de prueba	113
4.1.4. Ensayos de rotura de probetas a compresión y flexión	115
4.1.4.1. Rotura de probetas cilíndricas a compresión	115
4.1.4.2. Rotura de vigas a flexión	118
4.2. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	122
4.2.1. Resultados obtenidos del asentamiento de las mezclas de hormigón	122
4.2.1.1. Asentamiento de la mezcla de hormigón sin aditivo	122
4.2.1.2. Asentamiento de la mezcla de hormigón con aditivo	124
4.2.1.2.1. Mezcla adicionada con grafito	124
4.2.1.2.2. Mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido	126
4.2.2. Peso específico del hormigón	128
4.2.2.1. Peso específico del hormigón sin aditivo	128
4.2.2.2. Peso específico del hormigón con aditivo	130
4.2.2.2.1. Peso específico del hormigón con grafito	130
4.2.2.2.2. Peso específico del hormigón con limaduras de hierro fundido	133
4.2.3. Resultados obtenidos de probetas cilíndricas sometidas a compresión	138
4.2.3.1. Probetas cilíndricas de hormigón sin aditivo	138
4.2.3.2. Probetas cilíndricas de hormigón adicionadas con grafito	139
4.2.3.3. Probetas cilíndricas adicionadas con limaduras de hierro fundido	142
4.2.4. Resultados obtenidos de probetas prismáticas sometidas a flexión	144
4.2.4.1. Probetas prismáticas de hormigón sin aditivo	144
4.2.4.2.- Probetas prismáticas de hormigón adicionadas con grafito	146
4.2.4.3.- Probetas prismáticas adicionadas con limaduras de hierro fundido	149

4.2.5. Análisis comparativo de resistencias a flexión con y sin aditivo	151
4.2.5.1. Mezcla adicionada con grafito.....	152
4.2.5.2. Mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido	154
4.2.5.3. Mezcla adicionada con grafito, limaduras y mezcla patrón.....	156
4.2.6. Análisis comparativo entre las resistencias a compresión con y sin aditivo	158
4.2.6.1. Mezcla adicionada con grafito.....	158
4.2.6.2. Mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido	160
4.2.6.3 Mezcla adicionada con grafito, limaduras y mezcla patrón.....	162
4.2.7. Variación del asentamiento en relación a las resistencias obtenidas.....	163
4.2.7.1.- Resistencia a la flexión y asentamientos	164
4.2.7.2. Resistencia a compresión y asentamientos	166
4.2.8. Variación del peso específico en relación a las resistencias obtenidas	168
4.2.8.1. Resistencia a la flexión y pesos específicos.....	168
4.2.8.2. Resistencia a la compresión y pesos específicos	171
4.2.9. Aplicabilidad del concreto adicionado en pavimentos rígidos.....	174
4.2.10. Análisis de precios por m ³ de hormigón y km de carretera.....	188

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

	Página
5.1. CONCLUSIONES	191
5.2. RECOMENDACIONES	193
BIBLIOGRAFÍA.....	195
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 2.1. Asentamientos sugeridos.....	20
Tabla 2.2. Clasificación del concreto por su resistencia a compresión NB-011	23
Tabla 2.3. Clasificación por su resistencia a compresión “general o internacional”	23
Tabla 2.4. Clasificación por su resistencia a compresión “S.N.C”	23
Tabla 2.5. Clasificación “Ordenanza de urbanismo y construcción NCH 170”	24
Tabla 2.6. Clasificación “Ordenanza de urbanismo y construcción NCH 170”	24
Tabla 2.7. Clasificación del concreto por su peso unitario	32
Tabla 2.8. Resistencia a compresión del concreto	34
Tabla 2.9. Especificaciones de resistencia a compresión.....	34
Tabla 2.10. Resistencia mínima flexión para pavimentos rígidos	35
Tabla 2.11. Resistencias a flexión mínimas para pavimentos.....	35
Tabla 2.12. Especificaciones de resistencias en pavimentos rígidos	36
Tabla 2.13. Compuesto del cemento portland.....	39
Tabla 2.14. Cantidades aproximadas de calor generado en los primeros 7 días.....	40
Tabla 2.15. Métodos para medir la finura del cemento.....	41
Tabla 2.16. Calidad del cemento.....	44
Tabla 2.17. Resistencias del cemento NB-470.....	44
Tabla 2.18. Impurezas dentro del agua	46
Tabla 2.19. Cantidad de sustancias perjudiciales permisibles en el agregado fino.....	48
Tabla 2.20. Porcentajes para granulometría aconsejados ASTM C33	48
Tabla 2.21. Cantidad de sustancias perjudiciales permisibles en el agregado grueso	50
Tabla 2.22. Granulometría del agregado grueso ASTM C33	51
Tabla 2.23. Tabla de ensayo para la resistencia a la abrasión.....	54
Tabla 2.24. Porcentajes de adición en aditivos Sika	64
Tabla 2.25. Mezcla adicionada con grafito	64
Tabla 2.26. Mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido	65
Tabla 3.1. Resultados obtenidos de porcentaje de finos	70
Tabla 3.2. Contenido de humedad del agregado fino.....	71
Tabla 3.3. Resultados de la granulométrica del agregado fino	73

Tabla 3.4. Peso unitario suelto del agregado fino	75
Tabla 3.5. Peso unitario compactado del agregado fino	75
Tabla 3.6. Peso específico del agregado fino	77
Tabla 3.7. Resultado del ensayo equivalente de arena.....	79
Tabla 3.8. Equivalente de arena	79
Tabla 3.9. Resultados obtenidos contenido de humedad del agregado grueso	80
Tabla 3.10. Resultados de la granulometría del agregado grueso.....	82
Tabla 3.11. Peso unitario suelto del agregado grueso	84
Tabla 3.12. Peso unitario compactado del agregado grueso	84
Tabla 3.13. Peso específico y absorción del agregado grueso	86
Tabla 3.14. Peso del agregado y número de esferas para el ensayo.....	88
Tabla 3.15. Datos obtenidos en laboratorios de acuerdo al método seleccionado	88
Tabla 3.16. Resultados obtenidos del ensayo de desgaste de los ángeles.....	88
Tabla 3.17. Resultados obtenidos del peso específico del cemento.....	89
Tabla 3.18. Resultados obtenidos de la finura del cemento.....	90
Tabla 3.19. Material fino menor que tamiz N°200 (grafito).....	91
Tabla 3.20. Material fino menor que tamiz N°200 (limaduras de hierro fundido)	92
Tabla 4.1. Procedimiento de diseño ACI 211	94
Tabla 4.2. Asentamientos recomendados.....	95
Tabla 4.3. Tamaño máximo de los agregados según el tipo de construcción	96
Tabla 4.4. Requerimiento de agua aproximado	96
Tabla 4.5. Relación agua cemento en el hormigón.	97
Tabla 4.6. Relación agua cemento en el hormigón.	98
Tabla 4.7. Características de los componentes para la elaboración de la mezcla	99
Tabla 4.8. Datos obtenidos de tablas metodología ACI-211	99
Tabla 4.9. Dosificación por m ³ de hormigón	100
Tabla 4.10. Dosificación aconsejada para moldes cilíndricos	100
Tabla 4.11. Dosificación aconsejada para moldes prismáticos (vigas).....	100
Tabla 4.12. Asentamiento de la mezcla de hormigón sin aditivos.....	123
Tabla 4.13. Asentamiento de la mezcla de hormigón adicionada con grafito	124
Tabla 4.14. Asentamiento de la mezcla con limaduras de hierro fundido	126

Tabla 4.15. Peso específico de probetas cilíndricas sin aditivo	128
Tabla 4.16. Peso específico de probetas primaticas (vigas) sin aditivo	129
Tabla 4.17. Peso específico de probetas cilíndricas con grafito	130
Tabla 4.18. Peso volumétrico de probetas prismáticas con grafito.....	131
Tabla 4.19. Peso específico de probetas cilíndricas con limaduras de hierro fundido...	134
Tabla 4.20. Peso específico de probetas (vigas) con limaduras de hierro fundido	135
Tabla 4.21. Resistencia a compresión en probetas cilíndricas sin aditivo	138
Tabla 4.22. Resistencia a compresión adicionadas con grafito.....	140
Tabla 4.23. Resistencia a compresión en probetas con limaduras de hierro fundido. ...	142
Tabla 4.24. Resistencia a flexión en mezcla de hormigón sin aditivo	145
Tabla 4.25. Resistencia a flexión en mezcla de hormigón con grafito	146
Tabla 4.26. Resistencia a la flexión en mezcla con limaduras de hierro fundido	149
Tabla 4.27. Resultados obtenidos en los ensayos a flexión con y sin grafito	152
Tabla 4.28. Ensayo a flexión con y sin limaduras de hierro fundido.....	154
Tabla 4.29. Resultados de la resistencia a compresión con y sin grafito	158
Tabla 4.30. Resistencia a compresión con y sin limaduras de hierro fundido	160
Tabla 4.31. Análisis comparativo entre la resistencia a flexión y asentamiento.....	164
Tabla 4.32. Análisis comparativo entre la resistencia a compresión y asentamiento	167
Tabla 4.33. Análisis comparativo entre la resistencia a flexión y peso específico	169
Tabla 4.34. Análisis comparativo en la resistencia a compresión y peso específico	172
Tabla 4.35 Aforo vehicular	175
Tabla 4.36. Número de vehículos en Bolivia.....	176
Tabla 4.37. Resultados del índice y factor de crecimiento	177
Tabla 4.38. Resultados del tránsito de diseño	178
Tabla 4.39. Determinación del factor equivalente de carga.....	178
Tabla 4.40. Resultados de factor equivalente.....	179
Tabla 4.41. Factor direccional.....	179
Tabla 4.42. Nivel de serviciabilidad final	181
Tabla 4.43. Niveles de confiabilidad.....	181
Tabla 4.44. Niveles de confiabilidad.....	182
Tabla 4.45. Coeficientes de drenaje	182

Tabla 4.46. Resistencia a compresión en porcentajes óptimos	183
Tabla 4.47. Resistencia a flexión en porcentajes óptimos	183
Tabla 4.48. Módulo de elasticidad y perdida de soporte	184
Tabla 4.49. Parámetros de diseño	186
Tabla 4.50. Precios por metro cubico de hormigón con y sin aditivo.....	189
Tabla 4.51. Parámetros de las losas de hormigón	189
Tabla 4.52. Precios por metro kilómetro de carretera.....	190

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1. Estructura de un pavimento rígido.....	10
Figura 2.2. Componentes del pavimento rígido	11
Figura 2.3. Situación de carga en un punto extremo.....	12
Figura 2.4. Esfuerzo por temperatura.....	13
Figura 2.5. Pasos a seguir para el ensayo del cono de Abrams.....	17
Figura 2.6. Esfera de Kelly	18
Figura 2.7. Ruptura de probetas cilíndricas a compresión	21
Figura 2.8. Elaboración de probetas cilíndricas de hormigón ASTM C39	22
Figura 2.9. Dispositivo de resistencia a flexión	28
Figura 2.10. Resistencia a la flexión de vigas cargada en los puntos tercios.....	30
Figura 2.11. Resistencia a la flexión en pavimentos	31
Figura 2.12. Serie de tamices para granulometría.....	50
Figura 2.13. Grafito extraído de la mina y procesado.....	57
Figura 3.1. Ubicación de la planta de áridos “Charajas”	68
Figura 3.2. Extracción de material-planta de áridos “Charajas”	68
Figura 3.3. Ubicación de la tornería “Pinaya”	69
Figura 3.4. Extracción de limaduras de hierro fundido.....	69
Figura 3.5. Tamizado del agregado fino mediante vibrador mecánico.....	72
Figura 3.6. Material retenido en los tamices luego de realizar el tamizado	72
Figura 3.7. Peso unitario compactado del agregado fino	74
Figura 3.8. Secado superficial del agregado fino	76
Figura 3.9. Determinación del peso matraz	77
Figura 3.10. Material para realizar el equivalente de arena	78
Figura 3.11. Agitado manual del agregado fino.....	79
Figura 3.12. Tamizado mediante vibrador mecánico.....	81
Figura 3.13. Agregado grueso retenido en los tamices	81
Figura 3.14. Vaciado del agregado dentro del molde cilíndrico	83
Figura 3.15. Compactado del agregado grueso	84
Figura 3.16. Peso sumergido del agregado grueso.....	85

Figura 3.17. Secado superficial del agregado grueso.....	86
Figura 3.18. Equipo utilizado para el ensayo de desgaste de los ángeles	87
Figura 3.19. Determinación del peso específico del cemento.....	89
Figura 3.20. Material para determinar la finura del cemento.....	90
Figura 3.21. Determinación del material grafito que pasa tamiz N°200.....	91
Figura 3.22. Tamizado de las limaduras de hierro fundido.....	92
Figura 4.1. Lavado de los agregados (grava y arena)	102
Figura 4.2. Tamizado de limaduras de hierro fundido	102
Figura 4.3. Pesaje del grafito y grava.....	103
Figura 4.4. Preparación de materiales del hormigón previo al mezclado	104
Figura 4.5. Materiales del hormigón y aditivo previo al mezclado	104
Figura 4.6. Mezclado de materiales	105
Figura 4.7. Materiales del hormigón y aditivo previo al mezclado	105
Figura 4.8. Vaciado de la mezcla de hormigón para realizar el cono de Abrams.....	106
Figura 4.9. Varillado de la última capa en el cono de Abrams	107
Figura 4.10. Lectura del asentamiento	107
Figura 4.11. Ensayo del cono de abrams con mezcla adicionada con grafito.....	108
Figura 4.12. Ensayo del cono de abrams con mezcla adicionada con limaduras.....	108
Figura 4.13. Dimensiones de las vigas cilíndricas	109
Figura 4.14. Varillado de la mezcla de hormigón.....	110
Figura 4.15. Vibrado manual de la mezcla adicionada con grafito.....	110
Figura 4.16. Probetas cilíndricas terminado el vaciado	111
Figura 4.17. Desmoldado de probetas cilíndricas	111
Figura 4.18. Dimensiones de las probetas prismáticas	112
Figura 4.19. Probeta prismática de metal.....	112
Figura 4.20. Desmoldado de probetas y enrazado de probeta prismáticas	113
Figura 4.21. Curado de vigas y probetas cilíndricas	114
Figura 4.22. Probetas cilíndricas retiradas de la piscina de curado	115
Figura 4.23. Peso de las probetas cilíndricas	116
Figura 4.24. Ubicación de las probetas dentro de la prensa.....	117
Figura 4.25. Ubicación de las probetas dentro de la prensa.....	119

Figura 4.26. Retiro del curado y pesaje de las vigas	119
Figura 4.27. Pesaje de probetas prismáticas.....	120
Figura 4.28. Medición de los tercios de la viga	120
Figura 4.29. Rotura de vigas	121

ÍNDICE DE GRÁFICAS

	Página
Grafica 2.1. Asentamientos en la mezcla con grafito.....	65
Grafica 2.2. Asentamientos en la mezcla con limaduras	66
Gráfica 3.1. Curva granulométrica del agregado fino.....	73
Gráfica 3.2. Curva granulométrica del agregado grueso	82
Gráfica 4.1. Asentamiento de la mezcla de hormigón sin aditivos	123
Gráfica 4.2. Asentamiento en la mezcla con aditivo (grafito)	125
Gráfica 4.3. Mezcla con limaduras de hierro fundido (asentamiento).....	127
Gráfica 4.4. Peso específico de probetas con grafito (vigas y cilindros)	131
Gráfica 4.5. Variación del peso específico en vigas y cilindros con grafito	132
Gráfica 4.6. Peso específico con limaduras de hierro fundido (vigas y cilindros).....	136
Gráfica 4.7. Variación del peso específico con limaduras (vigas y cilindros).....	136
Gráfica 4.8. Probetas cilíndricas de hormigón sin aditivo sometidas a compresión.....	139
Gráfica 4.9. Probetas cilíndricas con grafito sometidas a compresión	140
Gráfica 4.10. Variación de la compresión en probetas cilíndricas con grafito	141
Gráfica 4.11. Compresión en probetas con limaduras de hierro fundido.....	143
Gráfica 4.12. Resistencia a compresión en la mezcla con limaduras.....	143
Gráfica 4.13. Mezcla de hormigón sin aditivo sometida a flexión	145
Gráfica 4.14. Resistencia a flexión de probetas prismáticas con grafito	147
Gráfica 4.15. Variación de la resistencia a flexión mezcla con grafito.....	147
Gráfica 4.16. Resistencia a flexión en mezclas con limaduras de hierro fundido	150
Grafica 4.17. Probetas prismáticas con limaduras de hierro fundido	150
Gráfica 4.18. Resistencia a flexión de la mezcla con y sin grafito	152
Grafica 4.19. Punto óptimo de adición de grafito - Resistencia a flexión	153
Gráfica 4.20. Resistencias a flexión-mezcla con y sin limaduras de hierro fundido.	155
Gráfica 4.21. Punto óptimo de adición de limaduras de hierro fundido - Flexión.....	156
Gráfica 4.22. Resistencias a flexión en la mezcla con limaduras, grafito y patrón	157
Gráfica 4.23. Análisis comparativo de resistencias a compresión con y sin grafito	158
Gráfica 4.24. Punto óptimo de adición de grafito - Compresión	159
Gráfica 4.25. Resistencias a compresión con y sin limaduras de hierro fundido.....	161

Grafica 4.26. Punto óptimo de adición de limaduras - compresión	161
Gráfica 4.27. Resistencias a compresión con y sin limaduras y grafito.....	163
Gráfica 4.28. Asentamientos y las resistencias a flexión con y sin aditivo	165
Gráfica 4 29. Asentamientos y las resistencias a compresión con y sin aditivo	168
Gráfica 4.30. Variación del peso específico y la resistencia a flexión con aditivos	169
Gráfica 4.31. Pesos específicos y las resistencias a flexión con y sin aditivo	170
Gráfica 4.32. Peso específico y la resistencia a compresión con aditivo	172
Gráfica 4.33. Peso específico y las resistencias a compresión con y sin aditivo	173