

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DPTO. DE ESTRUCTURA



“DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO DEL HORMIGÓN EN BASE A SU RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE 21 MPA, PRODUCIDOS CON AGREGADOS DE LAS CANTERAS CAIZA Y VILLA MONTES DE LA CIUDAD DE YACUIBA ”

Por:

CLAUDIO ALBARO MEDRANO AGUILERA

GESTIÓN 2019

Tarija – Bolivia

Agradecimientos.

En forma muy especial agradezco a Dios, a mis padres, hermanos, tíos y familiares; por estar siempre presentes, por ese cariño y apoyo incondicional en todo momento.

A la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho por abrir sus puertas de la enseñanza y el conocimiento, a los docentes quienes la conforman la Facultad de Ciencias y Tecnología.

A mis amigos de ayer, y hoy, por los consejos, la motivación y el apoyo que me brindaron oportunamente para dar un paso más en mi vida profesional.

Dedicatoria.

La concepción de este proyecto está dedicado a mis padres, Claudio Medrano y Silvia Aguilera quienes son el pilar fundamental de la formación de lo que hoy soy, por haber hecho el enorme sacrificio de darme la mejor herencia que puedo recibir y disfrutar, por su comprensión y la enseñanza del valor del trabajo, por su amor y sus consejos puedo decir que me siento orgulloso de tener una familia como la que Dios me regalo.

A mis hermanos, y a toda mi familia que supieron darme una palabra de ánimos para seguir adelante y poder vencer mis miedos.

ÍNDICE

Agradecimientos.....	i
Dedicatoria.....	ii
Índice de tablas.....	xi
Índice de figuras.....	xvi
Simbología.....	xviii
Resumen.....	xix
CAPITULO I. ESCRIPICION DEL PROYECTO.....	1
1.1 Problema de investigación.....	1
1.1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.1.2 Formulación del problema.....	2
1.1.3 Sistematización del problema.....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivo específico.....	3
1.3 Justificación.....	4
1.3.1 Académica.....	4
1.3.2 Técnica.....	4
1.3.3 Social.....	5
1.4 Alcance del proyecto.....	5
1.4.1 Hipótesis o análisis de alternativa.....	5
1.4.2 Resultados a lograr.....	5
1.4.3 Aporte académico.....	5
1.5 Variables de Estudios.....	7
1.5.1 Variables Independientes.....	7

1.5.2	Variables Dependiente.....	7
CAPITULO II. MARCO TEORICO		9
2.1	El hormigón.	9
2.2	Componentes del hormigón.	9
2.2.1	Cemento.....	10
2.2.1.1	Tipos de cementos.....	10
2.2.1.2	Propiedades del cemento portland.....	11
2.2.1.2.1	Hidratación y calor de hidratación.....	11
2.2.1.2.2	Peso específico.	11
2.2.1.2.3	Finura.	12
2.2.1.2.4	Fraguados.	12
2.2.1.3	Cementos producidos en Bolivia.	12
2.2.2	Agregados.	14
2.2.2.1	Generalidades.....	14
2.2.2.2	Clasificación de los agregados.....	14
2.2.2.3	Propiedades de los agregados.	15
2.2.2.3.1	Granulometría.....	15
2.2.2.3.1.1	Módulo de finura.	17
2.2.2.3.1.2	Tamaño máximo.....	17
2.2.2.3.1.3	Tamaño máximo nominal.	17
2.2.2.3.2	Forma y textura de la superficie de los agregados.....	18
2.2.2.3.3	Densidad y densidad aparente.	18
2.2.2.3.4	Absorción y humedad superficial.	19
2.2.2.3.5	Peso unitario.	19
2.2.2.3.5.1	Peso unitario suelto.....	20

2.2.2.3.5.2	Peso unitario compactado.	20
2.2.2.3.6	Resistencia a la compresión.	20
2.2.3	Agua para mezcla de hormigón.	20
2.2.3.1	Generalidades.	20
2.2.3.1.1	Característica del agua	21
2.2.3.1.1.1	Agua de mezclado.	21
2.2.3.1.1.2	Agua de curados.	22
2.2.3.1.1.3	Agua de lavado.	23
2.3	Propiedades del hormigón.	23
2.3.1	Generalidades.	23
2.3.2	Hormigón fresco.	23
2.3.2.1	Trabajabilidad.	24
2.3.2.2	Consistencia.	24
2.3.2.3	Docilidad.	25
2.3.2.4	Segregación.	25
2.3.2.5	Exudación o Sangrado.	26
2.3.3	Hormigón endurecido.	26
2.3.3.1	Densidad.	26
2.3.3.2	Compacidad.	26
2.3.3.3	Permeabilidad.	27
2.4	Propiedades mecánicas y módulo de elasticidad del hormigón.	27
2.4.1	Resistencia a la compresión.	27
2.4.2	Ley de Hooke.	29
2.4.3	Relación esfuerzo – deformación del hormigón a compresión.	31
2.4.4	Deformación.	32

2.4.5	Comportamiento elástico.....	32
2.4.6	Carácter no lineal de la relación esfuerzo – deformación.	32
2.4.7	Módulo de elasticidad estático.....	35
2.4.8	Relación de poisson.....	36
2.5	Dosificación del hormigón.....	37
2.5.1	Generalidades.....	37
2.5.2	Consistencia.	37
2.5.3	Resistencia.	38
2.6	Control estadístico de la resistencia del hormigón.....	38
2.6.1	Generalidades.....	38
2.6.2	Distribución de resistencia.....	38
2.6.3	Desviación estándar.....	39
2.6.4	Coefficiente de variación.	40
2.6.5	Variabilidad de la resistencia.	40
CAPITULO III. METODOLOGÍA		42
3.1	Tipo de investigación.	42
3.2	Población y muestra.	42
3.2.1	Probetas para pruebas iniciales.	43
3.2.2	Probetas para pruebas finales.....	43
3.3	Flujograma de proceso de trabajo de la presente investigación.....	45
3.4	Propiedades de los materiales	46
3.4.1	Estudio de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados de las canteras Villa Montes y Caiza.....	47
3.4.1.1	Método para extraer y preparar muestras.	47
3.4.1.2	Método para el cuarteo de muestras.....	47

3.4.1.3	Método para tamizar y determinar la granulometría	48
3.4.1.4	Método para determinar el material fino menor que 0,075mm.	52
3.4.1.5	Contenido total de agua de los áridos por secado.	52
3.4.1.6	Métodos para determinar la densidad aparente.....	53
3.4.1.7	Métodos para determinar la densidad real, densidad neta y la absorción de agua en los áridos gruesos.....	54
3.4.1.8	Métodos para determinar la densidad real, densidad neta y la absorción de agua en los áridos finos.....	55
3.4.1.9	Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los ángeles.	56
3.4.2	Estudio de las propiedades físicas y mecánicas del cemento.	56
3.4.2.1	Peso específico del cemento hidráulico.....	56
3.5	Pruebas y diseño de mezcla de hormigón.....	57
3.5.1	Diseño de mezcla para $f'c = 21$ MPa.....	57
3.5.2	Método de diseño.	57
3.5.2.1	Método del A.C.I.....	57
3.5.3	Diseño de la mezcla de prueba para la resistencia especificada de 21 MPa.....	62
3.5.3.1	Diseño de mezcla para la cantera de Caiza.....	62
3.5.3.2	Diseño de mezcla para la cantera de Villa Montes.	66
3.5.4	Análisis de las propiedades del hormigón fresco.....	69
3.5.5	Resultado de ensayos a compresión simple de las probetas realizadas con las mezclas de pruebas a los 28 días.	70
3.5.5.1	Resultado de los ensayos para la cantera de Caiza.	71
3.5.5.2	Resultado de los ensayos para la cantera de Villa Montes.	73
3.5.6	Ajustes de los parámetros de diseño.....	75
3.5.6.1	Contenido de agua.....	75
3.5.6.2	Corrección de la resistencia.	75

3.5.6.2.1	Corrección de resistencia para la cantera de Caiza.....	75
3.5.6.2.2	Corrección de resistencia para la cantera de Villa Montes.	76
3.6	Probetas estándar.....	77
3.6.1	Diseño de mezcla corregidas.	77
3.6.1.1	Diseño de mezcla para la cantera de Caiza.....	78
3.6.1.2	Diseño de mezcla cantera Villa Montes.	80
3.6.2	Programación de producción de probetas cilíndricas de hormigón.	82
3.6.3	Elaboración de las probetas finales.	83
3.6.3.1	Preparación y mezcla de los materiales.....	83
3.6.3.2	Comprobación de la consistencia del hormigón.	84
3.6.3.3	Elaboración de probetas de hormigón.	84
3.6.3.4	Curado de las probetas cilíndricas de hormigón.	85
3.6.4	Ensayo a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón.	85
3.6.4.1	Dimensiones de las probetas cilíndricas de hormigón.	85
3.6.4.2	Ensayo de compresión.	86
3.6.5	Ensayos a compresión para determinar el esfuerzo vs la deformación (módulo de elasticidad).....	86
CAPITULO IV. ANALISIS DE LOS RESULTADOS.....		88
4.1	Ensayos a compresión simple de las muestras.....	88
4.1.1	Ensayo de las muestras a los 7, 14 y 28 días.	88
4.1.2	Análisis para el diseño $f'c = 21$ MPa.....	90
4.1.3	Peso específico del hormigón.	92
4.1.3.1	Determinación del peso específico del hormigón para la cantera de Caiza.	92
4.1.3.2	Determinación del peso específico del hormigón para la cantera de Villa Montes.	94
4.2	Análisis de la resistencia característica con los resultados obtenidos.	95

4.2.1	Resistencia característica. Según Montoya, Meseguer & Mora (2011).	96
4.3	Determinación teórico, experimental y procesamiento estadístico del módulo de elasticidad.	98
4.3.1	Método teórico.	98
4.3.1.1	Módulo de elasticidad teórico cantera Caiza.	99
4.3.1.1.1	Módulo de elasticidad teórico según Montoya, Meseguer & Moran Cantera Caiza.	100
4.3.1.1.2	Resultado del módulo de elasticidad teórico cantera Caiza.	100
4.3.1.2	Módulo de elasticidad teórico cantera Villa Montes.	101
4.3.1.2.1	Módulo de elasticidad teórico según Montoya, Meseguer & Moran Cantera Villa Montes.	101
4.3.1.2.2	Resultado del módulo de elasticidad teórico cantera Villa Montes.	102
4.3.2	Método experimental.	102
4.3.2.1	Procesamiento de los resultados Esfuerzo vs Deformación.	102
4.3.2.2	Módulo de elasticidad experimentales para la cantera de Caiza y Villa Montes.	103
4.4	Determinación teórica del módulo de elasticidad según la propuesta ACI 318, NBHE (1225001) Y CBH - 87.	104
4.5	Comparación de los módulos de elasticidad experimental y teórico.	105
4.6	Determinación de la ecuación del módulo de elasticidad.	106
4.6.1	Función de regresión múltiple.	106
4.6.2	Determinación de la ecuación matemática calibrada del módulo de elasticidad estático a compresión del hormigón para la Cantera de Caiza.	106
4.6.3	Determinación de la ecuación matemática calibrada del módulo de elasticidad estático a compresión del hormigón para la Cantera de Villa Montes.	110
4.6.4	Comparaciones.	114
4.6.4.1	Comparación de la resistencia característica.	114

4.6.4.2 Comparación de módulos de elasticidad experimental.	114
CAPITULO V. CONCLUSION Y RECOMENDACIONES	116
5.1 Conclusión.	116
5.2 Recomendación.	119
BIBLIOGRAFÍA.	120
ANEXOS.....	122

Índice de tablas.

Tabla 1. Característica resistente de los cementos.....	13
Tabla 2. Requerimientos de granulometrías para agregados finos.	15
Tabla 3. Requisitos de granulometría para agregados gruesos.....	16
Tabla 4. Consistencia del hormigón en estado fresco.....	24
Tabla 5. Clasificación de la norma de control con resistencia hasta 35 MPa de acuerdo al ACI 214.77	40
Tabla 6. Lista de ensayos aplicados a los agregados.	46
Tabla 7. Resultados de ensayos medio de granulometría agregado grueso cantera Caiza. .	48
Tabla 8. Resultados de ensayo de granulometría agregado grueso cantera Caiza.....	49
Tabla 9. Resultados de ensayos medio de granulometría agregado fino cantera Caiza.....	49
Tabla 10. Resultados de ensayo de granulometría agregado fino cantera Caiza.....	49
Tabla 11. Ensayos medio de granulometría agregado grueso cantera Villa Montes.	50
Tabla 12. Resultados de ensayo de granulometría agregado grueso cantera Villa Montes. .	50
Tabla 13. Ensayos medio de granulometría agregado fino cantera Villa Montes.	51
Tabla 14. Resultados de ensayo de granulometría agregado fino cantera Villa Montes.	51
Tabla 15. Resultados de ensayo del material fino menor que 0,075 mm cantera Caiza.	52
Tabla 16. Resultados de ensayo del material fino menor que 0,075 mm cantera Villa Montes.....	52
Tabla 17. Resultado de ensayo contenido de humedad de los áridos cantera Caiza.	52
Tabla 18. Resultado de ensayo contenido de humedad de los áridos cantera Villa Montes.	52
Tabla 19. Resultado de ensayo densidad aparente agregado grueso cantera Caiza.	53
Tabla 20. Resultado de ensayo densidad aparente agregado fino cantera Caiza.	53
Tabla 21. Resultado de ensayo densidad aparente agregado grueso cantera Villa Montes.	53
Tabla 22. Resultado de ensayo densidad aparente agregado fino cantera Villa Montes.	53
Tabla 23. Resultado de ensayo la densidad real, densidad neta y la absorción de agua en los áridos gruesos cantera Caiza.	54

Tabla 24. Resultado de ensayo la densidad real, densidad neta y la absorción de agua en los áridos gruesos cantera Villa Montes.	54
Tabla 25. Resultado de ensayo la densidad real, densidad neta y la absorción de agua en los áridos finos cantera Caiza.....	55
Tabla 26. Resultado de ensayo la densidad real, densidad neta y la absorción de agua en los áridos finos cantera Villa Montes.	55
Tabla 27. Resultado de ensayo al desgaste mediante la máquina de los ángeles cantera Caiza.....	56
Tabla 28. Resultado de ensayo al desgaste mediante la máquina de los ángeles cantera Villa Montes.....	56
Tabla 29. Resultado de ensayo al desgaste mediante la máquina de los ángeles cantera Caiza.....	56
Tabla 30. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y tamaño máximo nominal de agregados dados.	58
Tabla 31. Factor de modificación para la desviación estándar de la muestra cuando se dispone menos de 30 ensayos.	59
Tabla 32. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando hay datos disponibles para establecer la desviación estándar.	60
Tabla 33. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer la desviación estándar.	60
Tabla 34. Relaciones entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto.	60
Tabla 35. Volumen aparente de agregado grueso por volumen unitario de concreto.	61
Tabla 36. Característica de los materiales cantera de Caiza.....	62
Tabla 37. Cantidad de los componentes de la dosificación para 1m ³ de hormigón, cantera Caiza.....	64
Tabla 38. Cantidad de los componentes para la primera prueba de mezclado cantera de Caiza.....	65

Tabla 39. Cantidad de los componentes para la primera prueba de mezcla por cada lote cantera de Caiza.....	65
Tabla 40. Característica de los materiales cantera de Villa Montes.	66
Tabla 41. Cantidad de los componentes de la dosificación para 1m ³ de hormigón cantera de Villa Montes.	67
Tabla 42. Cantidad de los componentes para la primera prueba de mezclado cantera de Villa Montes.	68
Tabla 43. Cantidad de los componentes para la primera prueba de mezcla para la cantera Villa Montes.	69
Tabla 44. Resumen de resultados mezclas de prueba cantera de Caiza.....	70
Tabla 45. Resumen de resultados mezclas de prueba cantera de Villa Montes.	70
Tabla 46. Resultados de ensayos a la compresión para la mezcla de prueba cantera Caiza.	71
Tabla 47. Comparación de la resistencia a los 28 días obtenidos del ensayo a compresión f'_c , con la resistencia requerida de compresión f'_{cr} para la cantera de Caiza.	72
Tabla 48. Resultados de ensayos a la compresión para la mezcla de prueba cantera Villa Montes.....	73
Tabla 49. Comparación de la resistencia a los 28 días obtenidos del ensayo a compresión f'_c , con la resistencia requerida de compresión f'_{cr} para la cantera de Villa Montes.....	74
Tabla 50. Característica de los materiales cantera de Caiza.....	78
Tabla 51. Cantidad de los componentes de la dosificación corregido para 1m ³ de hormigón, cantera Caiza.....	79
Tabla 52. Característica de los materiales cantera de Villa Montes.	80
Tabla 53. Cantidad de los componentes de la dosificación para 1m ³ de hormigón corregido cantera de Villa Montes.....	81
Tabla 54. Programa de producción de probetas para la cantera Caiza.	82
Tabla 55. Programa de producción de probetas para la cantera Villa Montes.	82
Tabla 56. Resultados de ensayos a la compresión a los 7 y 14 días cantera de Caiza.....	88
Tabla 57. Resultados de ensayos a la compresión a los 28 días cantera Caiza.	88

Tabla 58. Resultados de ensayos a la compresión a los 7, 14 días cantera de Villa Montes.	88
Tabla 59. Resultados de ensayos a la compresión a los 28 días cantera Villa Montes.....	89
Tabla 60. Resultado promedio de resistencia a la compresión simple en probetas cantera Caiza.....	90
Tabla 61. Resultado promedio de resistencia a la compresión simple en probetas cantera Villa Montes.	90
Tabla 62. Determinación del peso específico del hormigón para la cantera de Caiza.....	92
Tabla 63. Determinación del peso específico del hormigón para la cantera de Villa Montes.	94
Tabla 64. Cantera de Caiza resistencia máximas según Montoya.....	97
Tabla 65. Cantera de Villa Montes resistencia máximas según Montoya.	98
Tabla 66. Módulo de elasticidad teórico respecto a la resistencia cantera Caiza.	99
Tabla 67. Módulo de elasticidad teórico respecto a las medias de la resistencia cantera Caiza.....	100
Tabla 68. Módulo de elasticidad teórico respecto a la resistencia cantera Villa Montes. .	101
Tabla 69. Módulo de elasticidad teórico respecto a las medias de la resistencia cantera Villa Montes.....	102
Tabla 70. Módulo de elasticidad experimental de la cantera de Caiza.	103
Tabla 71. Módulo de elasticidad experimental de la cantera de Villa Montes.....	104
Tabla 72. Selección del módulo de elasticidad según Montoya, Meseguer & Moran cantera Caiza.....	104
Tabla 73. Selección del módulo de elasticidad según Montoya, Meseguer & Moran cantera Villa Monte.....	105
Tabla 74. Comparación del módulo de elasticidad experimental media, con la resistencia característica media utilizando las Normas mencionadas cantera Caiza.	105
Tabla 75. Comparación del módulo de elasticidad experimental media, con la resistencia característica media utilizando las Normas mencionadas cantera Villa Montes.....	105

Tabla 76. Datos de las variables de análisis para la cantera Caiza.	106
Tabla 77. Datos de las variables de análisis para la cantera Villa Montes.....	110
Tabla 78. Resumen de resistencias características medias canteras Caiza y Villa Montes.	114
Tabla 79. Tamaño de las muestras.....	129

Índice de figuras.

Figura 1. Proporciones típicas en volumen absoluto de los componentes del hormigón. ...	10
Figura 2. Estado de humedad de los agregados.....	19
Figura 3. Influencia de un exceso de agua en la consistencia y resistencia del hormigón... 22	
Figura 4. Consistencia del hormigón mediante prueba del cono de Abrams.	25
Figura 5. Cilindro estándar.....	28
Figura 6. Planos de rotura de los cilindros.	28
Figura 7. Influencia de la relación A/C en la resistencia del hormigón f'_c	29
Figura 8. Relación aproximada entre la edad del hormigón y la resistencia del cilindro. ...	29
Figura 9. Diagrama esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$).	30
Figura 10. Curvas de esfuerzo-deformación para hormigones de distinta resistencia.....	31
Figura 11. Comportamiento típico esfuerzo - deformación de la pasta de cemento, el agregado y el hormigón.....	34
Figura 12. Representación gráfica del comportamiento esfuerzo-deformación del hormigón bajo compresión uniaxial.	34
Figura 13. Diferentes tipos de módulos de elasticidad y el método por el cual estos son determinados.....	36
Figura 14. Relación de poisson.....	37
Figura 15. Histogramas de valores de resistencia.	39
Figura 16. Relación de la serie con respecto a la desviación normal para muestras de diferente tamaño.	40
Figura 17. Curva tiempo vs resistencia de las canteras de Caiza y Villa Montes.	91
Figura 18. Gráficos de barra peso específico del hormigón.....	93
Figura 19. Gráficos de barra peso específico del hormigón.....	95
Figura 20. Definición de la resistencia característica.	97
Figura 21. Gráfico Modulo de elasticidad vs Resistencia a la compresión cantera Caiza.	108
Figura 22. Gráfico de análisis 1 cantera de Caiza.	109
Figura 23. Gráfico de análisis 2 cantera de Caiza.	109

Figura 24. Gráfico Modulo de elasticidad vs Resistencia a la compresión cantera Villa Montes.....	112
Figura 25. Gráfico de análisis 3 cantera de Villa Montes.	113
Figura 26. Gráfico de análisis 4 cantera de Villa Montes.	113
Figura 27. Comparación de resultados observados y resultados esperados de la cantera Caiza.....	115
Figura 28. Comparación de resultados observados y resultados esperados de la cantera Villa Montes.....	115
Figura 29. Ubicación geográfica cantera Villa Montes respecto a la ciudad de Yacuiba..	125
Figura 30. Ubicación geográfica cantera Caiza respecto a la ciudad de Yacuiba.	126
Figura 31. Curva Típica Esfuerzo-Deformación para el hormigón bajo compresión y puntos para definir el módulo de elasticidad según ASTM C-469.....	216