

“UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**“EVALUACIÓN DE MODELOS PARA LA PREDICCIÓN DEL
MODULO RESILIENTE DE SUELOS FINOS PARA
SUBRASANTES”**

Por:

SAÍL FERNANDO RIVERA MEDINACELI

**ELABORADO EN LA MATERIA DE CIV-502 PROYECTO DE INGENIERÍA
CIVIL II DE LA MENCIÓN DE TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE
COMUNICACIÓN**

Diciembre del 2013

TARIJA – BOLIVIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE TOP. Y VÍAS DE COMUNICACIÓN

**“EVALUACIÓN DE MODELOS PARA LA PREDICCIÓN DEL
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS FINOS PARA
SUBRASANTES”**

Por:

SAÚL FERNANDO RIVERA MEDINACELI

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

Diciembre de 2013

TARIJA – BOLIVIA

El Tribunal Calificador del presente Trabajo, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo esta responsabilidad del autor.

DEDICATORIAS:

A Dios y a mi familia por su amor y apoyo en esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS:

El autor agradece en forma especial al Ing. Jhonny Mario Orgaz Fernández, por su valiosa asesoría y orientación durante su desarrollo.

A cuantos fueran participes en las diversas etapas de este trabajo, su colaboración ha sido de gran valor para mí.

PENSAMIENTO:

“Aprender es descubrir lo que ya sabes.
Actuar es demostrar que lo sabes.
Enseñar es recordarles a los demás que
saben tanto como tú”

RICHARD BACH

ÍNDICE

Página.

CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN

1. Introducción	1
2. Fundamentación Teórica.....	2
2.1. Presentación Conocimiento Científico.....	2
2.2. Análisis Investigaciones Anteriores	2
3. Diseño Teórico	4
3.1. Determinación del Problema	4
3.1.1. Situación Problemática	4
3.1.2. Problema	4
4. Hipótesis.....	4
5. Campo de acción.....	4
6. Justificación.....	5
7. Objetivos	5
7.1. Objetivo General	5
7.2. Objetivos Específicos.....	6
8. Alcance.....	6
9. Medios.....	7
10. Diseño Teórico- Metodológico	8

CAPÍTULO II - SUELOS DE SUBRASANTE

1. Introducción	9
2. Funciones	9

3. Forma de las Partículas	10
4. Caracterización de la Subrasante	11
4.1. Propiedades Físicas	11
4.1.1. Límites de Atterberg.....	11
4.1.1.1. Límite Líquido	12
4.1.1.2. Límite Plástico	13
4.1.1.3. Índice de Plasticidad	13
4.1.2. Granulometría	14
4.1.3. Clasificación de Suelos.....	15
4.1.3.1. Sistema de Clasificación de suelos AASHTO	16
4.1.3.2. Sistema de Clasificación de suelos SUCS	23
4.1.4. Relación de Fases.....	30
4.2. Propiedades ingenieriles.....	32
4.2.1. Valor Soporte del Suelo (CBR)	32
4.2.2. Módulo Resiliente.....	35
4.2.2.1. Principios del Módulo Resiliente	40
5. Determinación del Módulo Resiliente	44
5.1. Método de Ensayo	44
5.1.1. Objeto.....	45
5.1.2. Uso y significado	45
5.1.3. Equipos y Materiales	45
5.1.4. Preparación de especímenes de ensayo	49
5.1.5. Relaciones entre humedad y masa unitaria.....	50
5.1.6. Series de Prueba para suelos de Subrasante.....	50
6. Factores que afectan el Modulo Resiliente	52
6.1. Magnitud del Esfuerzo Desviador	52
6.2. Numero de Aplicaciones del Esfuerzo	53
6.3. Método de Compactación.....	53

6.4. Densidad y Contenido de Humedad	55
7. Correlación con CBR	57

CAPÍTULO III – METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE

1. Antecedentes	60
1.1. Modelos de Predicción del Módulo Resiliente.....	62
2. Muestreo.....	64
2.1. Criterios de Muestreo	65
2.2. Tipos de Muestreo	65
2.3. Identificación de las zonas de muestreo	66
2.4. Tipos de Muestra	68
3. Materiales a utilizar	68
4. Ensayos de Caracterización	69
4.1. Contenido de Humedad	69
4.1.1. Resultados	69
4.2. Granulometría.....	69
4.2.1. Resultados.....	69
4.3. Límites de Atterberg.....	70
4.3.1. Resultados.....	70
4.4. Clasificación.....	70
4.4.1. Resultados.....	70
4.5. Compactación T-99	71
4.5.1. Resultados.....	71
4.6. Compactación T- 180	71
4.6.1. Resultados.....	71
4.7. Peso Específico.....	72
4.7.1. Resultados.....	72

4.8. Análisis Hidrométrico	72
4.8.1. Resultados	72
4.9. Ensayo Triaxial.....	73
4.9.1. Procedimiento	73
4.9.2. Resultados	73
5. Regresión Lineal Múltiple.....	78
6. Análisis de Resultados	147

CAPÍTULO IV - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. CONCLUSIONES	149
2. RECOMENDACIONES	150

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	152
----------------------------------	-----

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página.
Figura 1. Carta de Plasticidad AASHTO.	21
Figura 2. Carta de Plasticidad SUCS.	26
Figura 3. Modelo de Clasificación SUCS	28
Figura 4. Esquema de un suelo parcialmente saturado.	30
Figura 5. Transmisión de cargas	37
Figura 6. Estado de esfuerzos provocados en la sub rasante por el paso de un vehículo en movimiento.....	38
Figura 7. Deformaciones bajo carga repetidas.	40
Figura 8. Esquema de esfuerzos al que son sometidas las muestras de ensayo	43
Figura 9. Deformación total: plástica más elástica o resiliente.....	44

Figura 10. Cámara Triaxial	46
Figura 11. Curva Calibración Anillo de la Cámara Triaxial.....	47
Figura 12. Variacion del módulo resiliente en función del estado de esfuerzos para suelos finos.....	52
Figura 13. Variación del módulo resiliente con el número de ciclos.....	53
Figura 14. Orientación de las partículas en arcillas compactadas.....	54
Figura 15. Líneas isocaracterísticas para las condiciones de $\sigma_d = 69$ KPa y $\sigma_3 = 13.8$ KPa.....	55
Figura 16. Comportamiento del módulo resiliente respecto al grado de saturación...	56
Figura 17. Correlaciones CBR - Mr.....	58
Figura 18. Concepto de esfuerzo cortante octaédrico	61
Figura 19. Forma de muestreo sistemática.....	66
Figura 20. Foto El Portillo	67
Figura 21. Foto Las Barrancas	67
Figura 22. Valores medidos y estimados muestra P-1 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8).....	87
Figura 23. Valores medidos y estimados muestra P-2 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8).....	88
Figura 24. Valores medidos y estimados muestra P-3 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8).....	89
Figura 25. Valores medidos y estimados muestra P-4 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8).....	90
Figura 26. Valores medidos y estimados muestra B-1 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8).....	91
Figura 27. Valores medidos y estimados muestra B-2 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8).....	92
Figura 28. Valores medidos y estimados muestra B-3 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8).....	93
Figura 29. Valores medidos y estimados muestra B-4 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8).....	94

Figura 30. Valores medidos y estimados muestra P-1 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)	95
Figura 31. Valores medidos y estimados muestra P-2 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)	96
Figura 32. Valores medidos y estimados muestra P-3 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)	97
Figura 33. Valores medidos y estimados muestra P-4 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)	98
Figura 34. Valores medidos y estimados muestra B-1 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)	99
Figura 35. Valores medidos y estimados muestra B-2 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)	100
Figura 36. Valores medidos y estimados muestra B-3 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)	101
Figura 37. Valores medidos y estimados muestra B-4 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)	102
Figura 38. Valores medidos y estimados muestra P-1 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)	103
Figura 39. Valores medidos y estimados muestra P-2 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)	104
Figura 40. Valores medidos y estimados muestra P-3 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)	105
Figura 41. Valores medidos y estimados muestra P-4 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)	106
Figura 42. Valores medidos y estimados muestra B-1 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)	107
Figura 43. Valores medidos y estimados muestra B-2 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)	108
Figura 44. Valores medidos y estimados muestra B-3 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)	109
Figura 45. Valores medidos y estimados muestra B-4 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)	110

Figura 46. Valores medidos y estimados muestra P-1 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)	122
Figura 47. Valores medidos y estimados muestra P-2 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)	123
Figura 48. Valores medidos y estimados muestra P-3 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)	124
Figura 49. Valores medidos y estimados muestra P-4 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)	125
Figura 50. Valores medidos y estimados muestra B-1 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)	126
Figura 51. Valores medidos y estimados muestra B-2 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)	127
Figura 52. Valores medidos y estimados muestra B-3 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)	128
Figura 53. Valores medidos y estimados muestra B-4 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)	129
Figura 54. Valores medidos y estimados muestra P-1 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)	130
Figura 55. Valores medidos y estimados muestra P-2 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)	131
Figura 56. Valores medidos y estimados muestra P-3 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)	132
Figura 57. Valores medidos y estimados muestra P-4 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)	133
Figura 58. Valores medidos y estimados muestra B-1 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)	134
Figura 59. Valores medidos y estimados muestra B-2 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)	135
Figura 60. Valores medidos y estimados muestra B-3 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)	136
Figura 61. Valores medidos y estimados muestra B-4 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)	137

Figura 62. Valores medidos y estimados muestra P-1 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)	138
Figura 63. Valores medidos y estimados muestra P-2 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)	139
Figura 64. Valores medidos y estimados muestra P-3 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)	140
Figura 65. Valores medidos y estimados muestra P-4 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)	141
Figura 66. Valores medidos y estimados muestra B-1 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)	142
Figura 67. Valores medidos y estimados muestra B-2 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)	143
Figura 68. Valores medidos y estimados muestra B-3 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)	144
Figura 69. Valores medidos y estimados muestra B-4 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)	145

ÍNDICE DE TABLAS

	Página.
Tabla 1. Límites de tamaño de suelos separados.	10
Tabla 2. Aberturas de Tamices.....	15
Tabla 3. Tabla AASHTO para clasificación.	22
Tabla 4. Tabla AASHTO para clasificación.	25
Tabla 5. Tabla SUCS para clasificación	27
Tabla 6. CBR y clasificación.	35
Tabla 7. Valores representativos del Mr según la guía AASHTO.....	42
Tabla 8. Series de prueba para materiales tipo 1.....	51
Tabla 9. Series de prueba para materiales tipo 2.....	51

Tabla 10. Factores de corrección a las correlaciones CBR – Mr	59
Tabla 11. Modelos del estudio LTPP	63
Tabla 12. Modelos de la Universidad de Wisconsin.....	64
Tabla 13. Profundidad de los muestreos	68
Tabla 14. Contenido de Humedad Natural Muestras	69
Tabla 15. Granulometría	69
Tabla 16. Límites de Atterberg de las muestras	70
Tabla 17. Clasificación de las muestras	70
Tabla 18. Densidad seca máxima y CHO T-99.....	71
Tabla 19. Densidad seca máxima y CHO T-180.....	71
Tabla 20. Peso específico de los suelos	72
Tabla 21. Análisis Hidrométrico muestras.....	72
Tabla 22. Módulo resiliente P1 portillo	74
Tabla 23. Módulo resiliente P2 portillo	74
Tabla 24. Módulo resiliente P3 portillo	75
Tabla 25. Módulo resiliente P4 portillo	75
Tabla 26. Módulo resiliente B1 Barrancas.....	76
Tabla 27. Módulo resiliente B2 Barrancas.....	76
Tabla 28. Módulo resiliente B3 Barrancas.....	77
Tabla 29. Módulo resiliente B4 Barrancas.....	77
Tabla 30. Variables de entrada.....	78
Tabla 31. Propiedades Físicas de los suelos estudiados.....	85
Tabla 32. Coeficientes de Regresión para las ecuaciones (6) a (14).....	86
Tabla 33. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 1 modelo LTPP ecuaciones (6) a (8)	87
Tabla 34. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 2 modelo LTPP ecuaciones (6) a (8)	88
Tabla 35. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 3 modelo LTPP ecuaciones (6) a (8)	89

Tabla 36. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 4 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)	90
Tabla 37. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 1 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)	91
Tabla 38. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 2 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)	92
Tabla 39. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 3 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)	93
Tabla 40. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 4 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)	94
Tabla 41. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 1 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)	95
Tabla 42. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 2 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)	96
Tabla 43. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 3 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)	97
Tabla 44. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 4 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)	98
Tabla 45. Valores de Modulo Resiliente muestra B– 1 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)	99
Tabla 46. Valores de Modulo Resiliente muestra B– 2 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)	100
Tabla 47. Valores de Modulo Resiliente muestra B– 3 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)	101
Tabla 48. Valores de Modulo Resiliente muestra B– 4 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)	102
Tabla 49. Valores de Modulo Resiliente muestra P– 1 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)	103
Tabla 50. Valores de Modulo Resiliente muestra P– 2 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)	104
Tabla 51. Valores de Modulo Resiliente muestra P– 3 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)	105

Tabla 52. Valores de Modulo Resiliente muestra P– 4 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)	106
Tabla 53. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 1 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)	107
Tabla 54. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 2 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)	108
Tabla 55. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 3 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)	109
Tabla 56. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 4 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)	110
Tabla 57. Ajuste a la ecuación (6) para estimar K_1 según propiedades físicas	111
Tabla 58. Ajuste a la ecuación (7) para estimar K_2 según propiedades físicas	112
Tabla 59. Ajuste a la ecuación (8) para estimar K_3 según propiedades físicas	113
Tabla 60. Ajuste a la ecuación (9) para estimar K_1 según propiedades físicas	114
Tabla 61. Ajuste a la ecuación (10) para estimar K_2 según propiedades físicas	115
Tabla 62. Ajuste a la ecuación (11) para estimar K_3 según propiedades físicas	116
Tabla 63. Ajuste a la ecuación (12) para estimar K_1 según propiedades físicas	117
Tabla 64. Ajuste a la ecuación (13) para estimar K_2 según propiedades físicas	118
Tabla 65. Ajuste a la ecuación (14) para estimar K_3 según propiedades fisca.....	119
Tabla 66. Modelos Reajustados del Estudio LTTP.....	120
Tabla 67. Modelos Reajustados de la Universidad de Wisconsin	120
Tabla 68. Coeficientes de Regresión para las ecuaciones (15) a (23).....	121
Tabla 69. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 1 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)	122
Tabla 70. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 2 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)	123
Tabla 71. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 3 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)	124
Tabla 72. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 4 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)	125

Tabla 73. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 1 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)	126
Tabla 74. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 2 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)	127
Tabla 75. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 3 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)	128
Tabla 76. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 4 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)	129
Tabla 77. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 1 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)	130
Tabla 78. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 2 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)	131
Tabla 79. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 3 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)	132
Tabla 80. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 4 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)	133
Tabla 81. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 1 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)	134
Tabla 82. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 2 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)	135
Tabla 83. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 3 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)	136
Tabla 84. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 4 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)	137
Tabla 85. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 1 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)	138
Tabla 86. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 2 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)	139
Tabla 87. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 3 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)	140
Tabla 88. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 4 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)	141

Tabla 89. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 1 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)	142
Tabla 90. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 2 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)	143
Tabla 91. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 3 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)	144
Tabla 92. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 4 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)	145
Tabla 93. Criterio Estadístico de buen ajuste.....	146
Tabla 94. Evaluación de los modelos de estimación del módulo resiliente.....	146