

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**“ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DEL MEDIDOR DE PERMEABILIDAD EN
LABORATORIO, PERMEÁMETRO DE COMPACTACIÓN H – 4146, EN
SUELOS ARCILLOSOS”**

AUTOR:

DANIEL ALBERTO ROMERO ESTRADA

SEMESTRE I - 2019

TARIJA – BOLIVIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**“ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DEL MEDIDOR DE PERMEABILIDAD EN
LABORATORIO, PERMEÁMETRO DE COMPACTACIÓN H – 4146, EN
SUELOS ARCILLOSOS”**

AUTOR:

DANIEL ALBERTO ROMERO ESTRADA

PROYECTO ELABORADO EN LA ASIGNATURA CIV - 502

SEMESTRE I - 2019

TARIJA – BOLIVIA

V°B°

.....
M. Sc. Ing. Ernesto R. Alvarez Gozalvez
**DECANO FACULTAD CIENCIAS Y
TECNOLOGÍA**

.....
M. Sc. Lic. Elizabeth Castro Figueroa
**VICEDECANA FACULTAD CIENCIAS Y
TECNOLOGÍA**

APROBADO POR:

TRIBUNAL:

.....
M. Sc. Ing. Laura K. Soto Salgado

.....
M. Sc. Ing. José Ricardo Arce Avendaño

.....
M. Sc. Ing. Moisés Díaz Ayarde

ADVERTENCIA.

El tribunal calificador del presente trabajo, no se solidariza con los términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo esta responsabilidad del autor.

DEDICATORIA.

A mis padres Freddy Romero y Florinda Estrada por ser los pilares fundamentales en mi familia y enseñarme con el ejemplo, que puedes lograr todo lo que te proyectas si perseveras en ello y a mis hermanos Eduardo, Alejandro y Jael por creer en mí y ser uno de los motivos primordiales para seguir creciendo como persona.

AGRADECIMIENTO.

Primeramente, a Dios por darme vida, salud y fortaleza en mis momentos de debilidad.

A mis padres por el apoyo incondicional, el esfuerzo y la paciencia que me tuvieron durante mi formación profesional.

A mi hermano Eduardo y su esposa Tania por ayudarme con su experiencia ante las circunstancias que surgían en mi carrera.

A mis docentes que día a día me transmitieron mi sabiduría en cada una de las áreas de la Ingeniería Civil.

A mi docente guía, Marcelo Segovia Cortez, por haberme transmitido sus conocimientos y su apoyo para poder realizar mi trabajo de investigación.

Al técnico de Laboratorio de Suelos y Asfaltos, Carlos Subia, por el asesoramiento brindado en los ensayos de laboratorio.

PENSAMIENTO.

“La verdadera ignorancia no es la ausencia de conocimientos, si no el hecho de rehusarse a adquirirlos.”

Karl Popper.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN AL TEMA

	Página
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2.1. Problema.....	2
1.2.2. Sistematización del problema.....	2
1.2.3. Relevancia y factibilidad del problema.....	2
1.2.4. Delimitación temporal y espacial del problema.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4. OBJETIVOS.....	3
1.4.1. Objetivo General.....	3
1.4.2. Objetivos Específicos.....	4
1.5. HIPÓTESIS.....	4
1.6. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES.....	4
1.6.1. Variable independiente.....	4
1.6.2. Variable dependiente.....	4
1.6.3. Conceptualización y operacionalización de las variables.....	5
1.7. IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	5
1.8. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	6
1.9. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	6

CAPÍTULO II

CONCEPTUALIZACIÓN DEL TEMA

	Página
2.1. SUELO	8
2.2. ARCILLAS	8
2.2.1. Minerales constitutivos de las arcillas	8
2.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS ENSAYADOS	10
2.3.1. Densidad de los sólidos	10
2.3.2. Análisis mecánico del suelo	11
2.3.2.1. Análisis por cribado	11
2.3.2.2. Análisis hidrométrico.....	12
2.3.3. Plasticidad.....	14
2.3.3.1. Estados de consistencia, límites de plasticidad.....	14
2.3.3.2. Determinación del límite líquido	15
2.3.3.3. Determinación del límite plástico	16
2.3.4. Compactación de suelos	17
2.3.4.1. Principios generales	17
2.3.4.2. Prueba Proctor modificada.....	18
2.4. CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS	18
2.4.1. Introducción.....	18
2.4.2. Objetivo	19
2.4.3. Materiales	19
2.4.4. Fundamentación.....	19
2.4.4.1. Sistema de clasificación SUCS. (Unified Soil Classification System).....	19

2.4.5.	Metodología.....	23
2.4.5.1.	Sistema SUCS.....	23
2.5.	PERMEABILIDAD	23
2.5.1.	Introducción.....	23
2.5.2.	Flujos laminar y turbulento.....	24
2.5.3.	Flujo del agua en el suelo y ecuación de energía de Bernoulli.....	25
2.5.4.	Ley de Darcy	27
2.5.5.	Validez de la ley de Darcy.....	29
2.5.6.	Factores que influyen en el valor de permeabilidad de un suelo.....	31
2.5.7.	Métodos para medir el coeficiente de permeabilidad de suelo.....	32
2.5.7.1.	Permeámetro de carga variable.....	33
2.5.8.	Errores probables.....	34
2.6.	PERMEÁMETRO DE COMPACTACIÓN H – 4146	35
2.6.1.	Introducción.....	35
2.6.2.	Preparación de la muestra.....	35
2.6.3.	Características físicas del equipo.....	35
2.7.	PERMEÁMETRO DE PARED FLEXIBLE	36
2.7.1.	Introducción.....	36
2.7.2.	Preparación de la muestra.....	36
2.7.3.	Características de equipo	36
2.8.	ANÁLISIS DE DATOS CUANTITATIVOS.....	37
2.8.1.	Estadística Descriptiva	37
2.8.1.1.	Distribución de frecuencias	37
2.8.1.2.	Medidas de tendencia central.....	39
2.8.1.3.	Medidas de variabilidad.....	39

2.8.1.4. Asimetría y curtosis	40
2.8.2. Confiabilidad o fiabilidad lograda por el permeámetro de compactación H -4146.....	41
2.8.2.1. Método de las formas paralelas	41
2.8.2.2. Método Alfa de Cronbach	42
2.8.3. Análisis estadístico inferencial	43
2.8.3.1. Estadística inferencial	43
2.8.3.1.1. Distribución muestral	43
2.8.3.1.2. Nivel de significancia o significación	43
2.8.3.1.3. Relación entre distribución muestral y el nivel de significancia.....	44
2.8.3.1.4. Prueba de hipótesis	44
2.8.3.1.5. Análisis paramétrico	44
2.8.3.1.5.1. Regresión y correlación.....	45
2.8.3.1.5.2. Prueba t de Student.....	52
2.8.3.1.5.3. Análisis de varianza de un factor ANOVA	53

CAPÍTULO III
DESARROLLO EXPERIMENTAL

	Página
3.1. INTRODUCCIÓN	55
3.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES EN ESTUDIO	55
3.2.1. Descripción y ubicación de los suelos estudiados	55
3.2.1.1. Fotos satelitales Google Earth de los barrios de extracción	57
3.2.2. Coordenadas de las zonas de estudio.....	60
3.3. CRITERIO DE SELECCIÓN DE MUESTRAS.....	60
3.3.1. Toma de muestras.....	60
3.3.1.1. Equipo utilizado.....	61
3.3.1.2. Procedimiento de extracción de la muestra	61
3.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS.....	63
3.5. ENSAYO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	64
3.5.1. Introducción.....	64
3.5.2. Objetivo	64
3.6. ENSAYO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR MEDIO DEL HIDRÓMETRO	65
3.6.1. Introducción.....	65
3.6.2. Objetivo	65
3.7. DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO DE LOS SUELOS.....	66
3.7.1. Objetivo	66
3.8. ENSAYO DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS.....	66
3.8.1. Introducción.....	66
3.8.2. Objetivo	66

3.9.	ENSAYO DEL LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS.....	67
3.9.1.	Introducción.....	67
3.9.2.	Objetivo	67
3.10.	ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO	68
3.10.1.	Introducción.....	68
3.10.2.	Objetivo	68
3.11.	POROSIDAD, RELACIÓN DE VACÍOS Y EXPANSIÓN	70
3.12.	ENSAYO DE MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD EN LABORATORIO, (PERMEÁMETRO DE COMPACTACIÓN H – 4146 DE CARGA VARIABLE).....	73
3.13.	ENSAYO DE MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD EN LABORATORIO, (PERMEÁMETRO DE PARED FLEXIBLE DE CARGA VARIABLE).....	74
3.14.	ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	74
3.14.1.	Método de permeámetro de compactación H - 4146 de carga variable.....	74
3.14.2.	Método del permeámetro de pared flexible carga variable	81

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS DE RESULTADOS

	Página
4.1. PRUEBAS DE DISTRIBUCIÓN	87
4.1.1. Distribución normal de permeabilidad medida con el permeámetro de compactación H-4146.....	87
4.1.2. Distribución normal de permeabilidad medida con el permeámetro de pared flexible.....	88
4.2. PRUEBAS T DE STUDENT	89
4.2.1. Prueba t para una muestra.....	89
4.2.2. Prueba t para muestras independientes.....	94
4.3. CONFIABILIDAD.....	100
4.3.1. Coeficiente alfa de Cronbach	100
4.3.2. Coeficiente de forma paralelas	101
4.4. COMPARACIÓN DE LAS PERMEABILIDADES OBTENIDAS POR LOS DIFERENTES MÉTODOS	102
4.5. REGRESIÓN Y CORRELACIÓN	108
4.5.1. Correlación	108
4.5.2. Regresión	110

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

	Página
5.1. CONCLUSIONES	119
5.2. RECOMENDACIONES	120

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ANEXO I	NORMA DEL PERMEÁMETRO DE COMPACTACIÓN H – 4146 ASTM D5856
ANEXO II	ENSAYOS DE LABORATORIO Y REPORTE FOTOGRÁFICO
ANEXO III	PROCESAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO
ANEXO IV	CÁLCULOS ADICIONALES
ANEXO V	GUÍA PARA EL ENSAYO DE LABORATORIO, PERMEÁMETRO DE COMPACTACIÓN H – 4146

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. 1. Conceptualización y operacionalización de variable independiente.	5
Tabla 1. 2. Conceptualización y operacionalización de variable dependiente.	5
Tabla 2. 1. Densidad de sólidos de materiales importantes.....	11
Tabla 2. 2. Tamaño de mallas estándar ASTM.....	12
Tabla 2. 3. Simbología SUCS.....	20
Tabla 2. 4. Simbología SUCS.....	20
Tabla 2. 5. Caso frontera para gravas.....	21
Tabla 2. 6. Caso frontera para arenas.....	21
Tabla 2. 7. Tabla de clasificación SUCS.....	22
Tabla 3. 1. Coordenadas de los barrios de estudio.....	60
Tabla 3. 2. Resumen de los resultados de la granulometría	64
Tabla 3. 3. Resumen de los resultados del hidrómetro	65
Tabla 3. 4. Resumen de los resultados de peso específico	66
Tabla 3. 5. Resumen de los resultados de los límites de consistencia	67
Tabla 3. 6. Resumen de los resultados de clasificación	68
Tabla 3. 7. Resumen de los resultados de compactación	69
Tabla 3. 8. Resumen de los resultados de porosidad y relación de vacíos iniciales	70
Tabla 3. 9. Resumen de los resultados de expansión	71

Tabla 3. 10. Resumen de los resultados de porosidad y relación de vacíos finales	72
Tabla 3. 11. Resumen de los resultados de permeabilidad, permeámetro de compactación H-4146 de carga variable.....	73
Tabla 3. 12. Resumen de los resultados de permeabilidad, permeámetro de pared flexible de carga variable.....	74
Tabla 3. 13. Medidas estadísticas muestras barrio El Portillo, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL.....	75
Tabla 3. 14. Medidas estadísticas muestras barrio Pedro Antonio Flores, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL.....	76
Tabla 3. 15. Medidas estadísticas muestras barrio San Salvador, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL.....	77
Tabla 3. 16. Medidas estadísticas muestras barrio Los Chapacos, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH.....	78
Tabla 3. 17. Medidas estadísticas muestras barrio 20 de Enero, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH.....	79
Tabla 3. 18. Medidas estadísticas muestras barrio La Florida, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH.....	80
Tabla 3. 19. Medidas estadísticas muestras barrio El Portillo, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL.....	81
Tabla 3. 20. Medidas estadísticas muestras barrio Pedro Antonio Flores, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL.....	82
Tabla 3. 21. Medidas estadísticas muestras barrio San Salvador, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL.....	83

compactación H-4146	92
Tabla 4. 8. Prueba t de Student de las permeabilidades del barrio	
La Florida, medidas con el permeámetro de compactación	
H-4146.....	93
Tabla 4. 9. Prueba t de Student de las permeabilidades del barrio	
El Portillo, medidas con el permeámetro de compactación	
H-4146 y el permeámetro de pared flexible.....	94
Tabla 4. 10. Prueba t de Student de las permeabilidades del barrio	
Pedro Antonio Flores, medidas con el permeámetro de	
compactación H-4146 y el permeámetro de pared flexible	95
Tabla 4. 11. Prueba t de Student de las permeabilidades del barrio	
San Salvador, medidas con el permeámetro de	
compactación H-4146 y el permeámetro de pared flexible	96
Tabla 4. 12. Prueba t de Student de las permeabilidades del barrio	
Los Chapacos, medidas con el permeámetro de	
compactación H-4146 y el permeámetro de pared flexible	97
Tabla 4. 13. Prueba t de Student de las permeabilidades del barrio	
20 de Enero, medidas con el permeámetro de	
compactación H-4146 y el permeámetro de pared flexible	98
Tabla 4. 14. Prueba t de Student de las permeabilidades del barrio	
La Florida, medidas con el permeámetro de	
compactación H-4146 y el permeámetro de pared flexible	99
Tabla 4. 15. Matriz de alfa Cronbach.....	100
Tabla 4. 16. Coeficiente de confiabilidad alfa de Cronbach.....	100

Tabla 4. 17. Coeficiente de confiabilidad de formas paralelas	101
Tabla 4. 18. Correlación Pearson entre permeabilidad y densidad	108
Tabla 4. 19. Correlación Spearman entre permeabilidad y densidad.....	109
Tabla 4. 20. Regresión lineal entre permeabilidad y densidad	110
Tabla 4. 21. Regresión logarítmica entre permeabilidad y densidad	112
Tabla 4. 22. Regresión potencial entre permeabilidad y densidad.....	114
Tabla 4. 23. Regresión exponencial entre permeabilidad y densidad	116
Tabla 4. 24. Comparación de regresiones	117

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Página
Gráfico 3. 1. Histograma de permeabilidad muestras barrio El Portillo, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL	75
Gráfico 3. 2. Histograma de permeabilidad muestras barrio Pedro Antonio Flores, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL.....	76
Gráfico 3. 3. Histograma de permeabilidad muestras barrio San Salvador, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL.....	77
Gráfico 3. 4. Histograma de permeabilidad muestras barrio Los Chapacos, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH	78
Gráfico 3. 5. Histograma de permeabilidad muestras barrio 20 de Enero, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH.....	79
Gráfico 3. 6. Histograma de permeabilidad muestras barrio La Florida,	

arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH	80
Gráfico 3. 7. Histograma de permeabilidad muestras barrio El Portillo, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL.....	81
Gráfico 3. 8. Histograma de permeabilidad muestras barrio Pedro Antonio Flores, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL.....	82
Gráfico 3. 9. Histograma de permeabilidad muestras barrio San Salvador, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL.....	83
Gráfico 3. 10. Histograma de permeabilidad muestras barrio Los Chapacos, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH	84
Gráfico 3. 11. Histograma de permeabilidad muestras barrio 20 de Enero, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH.....	85
Gráfico 3. 12. Histograma de permeabilidad muestras barrio La Florida, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH	86
Grafico 4. 1. Coeficiente forma paralelas.....	101
Gráfico 4. 2. Comparación de la permeabilidad obtenida por los dos métodos, barrio El Portillo, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL.....	102
Gráfico 4. 3. Comparación de la permeabilidad obtenida por los dos métodos, barrio Pedro Antonio Flores, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL.....	103
Gráfico 4. 4. Comparación de la permeabilidad obtenida por los dos métodos, barrio San Salvador, arcilla inorgánica	

de mediana compresibilidad CL.....	103
Gráfico 4. 5. Comparación de la permeabilidad obtenida por los dos métodos, barrio Los Chapacos, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH	104
Gráfico 4. 6. Comparación de la permeabilidad obtenida por los dos métodos, barrio 20 de Enero, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH	104
Gráfico 4. 7. Comparación de la permeabilidad obtenida por los dos métodos, barrio La Florida, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH	105
Gráfico 4. 8. Comparación general de la permeabilidad obtenida mediante el permeámetro de compactación H-4146 y permeámetro de pared flexible.....	106
Gráfico 4. 9. Comparación de la permeabilidad promedio obtenida por los dos métodos, en suelos arcillosos de mediana compresibilidad (CL)	107
Gráfico 4. 10. Comparación de la permeabilidad promedio obtenida por los dos métodos, en suelos arcillosos de alta compresibilidad (CH).....	107
Gráfico 4. 11. Regresión lineal entre permeabilidad y densidad	111
Gráfico 4. 12. Regresión logarítmica entre permeabilidad y densidad	113
Gráfico 4. 13. Regresión potencial entre permeabilidad y densidad.....	115
Gráfico 4. 14. Regresión exponencial entre permeabilidad y densidad	117

ÍNDICE DE IMÁGENES

	Página
Imagen 2. 1. Carta de plasticidad SUCS	23
Imagen 2. 2. Demostración flujo laminar y turbulento	24
Imagen 2. 3. Esquema del dispositivo experimental de Darcy	25
Imagen 2. 4. Permeámetro horizontal de Darcy.....	28
Imagen 2. 5. Velocidades del fluido a través de la muestra	30
Imagen 2. 6. Esquema del permeámetro de carga variable.....	33
Imagen 2. 7. Permeámetro de compactación H-4146	36
Imagen 2. 8. Permeámetro de pared flexible.....	37
Imagen 2. 9. Histograma de frecuencias	38
Imagen 2. 10. Diagrama de dispersión.....	45
Imagen 2. 11. Regresión lineal simple	46
Imagen 2. 12. Regresión lineal simple	47
Imagen 2. 13. Interpretación del coeficiente de determinación	50
Imagen 2. 14. Curva de distribución normal.....	50
Imagen 2. 15. Curva de distribución t de Student	51
Imagen 3. 1. Mapa político de Tarija	56
Imagen 3. 2. Mapa de la Provincia Cercado	56
Imagen 3. 3. Barrio Portillo de la ciudad de Tarija, extracción de muestra.....	57
Imagen 3. 4. Barrio Pedro Antonio Flores de la ciudad de Tarija, extracción de muestra.....	57
Imagen 3. 5. Barrio San Salvador de la ciudad de Tarija, extracción de muestra	58

Imagen 3. 6. Barrio La Florida de la ciudad de Tarija, extracción de muestra	58
Imagen 3. 7. Barrio Los Chapacos de la ciudad de Tarija, extracción de muestra	59
Imagen 3. 8. Barrio 20 de Enero de la ciudad de Tarija, extracción de muestra	59
Imagen 3. 9. Extracción de muestras	62
Imagen 3. 10. Caracterización de los suelos	63