

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE
COMUNICACIÓN**



**ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD PORTANTE DE SUELOS EN
FUNCIÓN AL TIPO DE FUNDACIÓN SUPERFICIAL Y
PARÁMETROS DE RIGIDEZ DE SUELO**

Por:

DOUGLAS HECTOR SÁNCHEZ CASTELLÓN.

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 / GESTIÓN 2020

TARIJA – BOLIVIA

DEDICATORIA:

A MI PAPÁ:

Roger Sánchez, forjador de mi camino. Noble y trabajador, siempre orientándonos a ser personas de bien.

A MI MAMÁ:

Marisol Castellón, compasiva y dedicada. Sin esperar nada a cambio hace lo que sea por su familia.

A MIS HIJAS:

Viana y Mariana, significan todo en la vida para mí y en cada paso que doy siempre están presentes.

A ellos, por incentivar me en el camino hacia la superación.

ÍNDICE

Advertencia
Dedicatoria
Agradecimientos
Pensamiento
Resumen

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO

	Página
1.1. JUSTIFICACIÓN.	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	1
1.2.1. Situación problemática.	1
1.2.2. Problema.	2
1.3. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN.	3
1.3.1. Objetivo general.	3
1.3.2. Objetivos específicos.	3
1.4. HIPÓTESIS.	3
1.5. DEFINICIÓN DE VARIABLES.	3
1.5.1. Variables dependientes.	4
1.5.2. Variables independientes.	4
1.6. ALCANCE.	4

CAPÍTULO II FUNDAMENTOS DE CAPACIDAD PORTANTE

	Página
2.1. ESFUERZO TOTAL.	5
2.1.1. Esfuerzo efectivo.	5
2.1.2. Estabilidad a corto y largo plazo.	8
2.1.3. La interacción de la estructura del suelo y el agua de los poros.	9

2.1.4. La generación de presión de poros en la carga de suelos reales.	11
2.1.5. La condición de descarga.	12
2.1.6. La condición de carga.	13
2.2. RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE.	14
2.2.1. La naturaleza de la resistencia al corte.	14
2.2.2. Medición de la resistencia al corte.	15
2.2.2.1. Mediciones directas e indirectas.	15
2.2.2.2. Mediciones drenadas y sin drenaje.	16
2.2.3. Criterios de falla idealizados por resistencia al esfuerzo cortante.	18
2.2.3.1. Resistencia al esfuerzo cortante en estado drenado.	18
2.2.3.2. Resistencia al esfuerzo cortante en estado no drenado.	21
2.3. ASENTAMIENTO DE FUNDACIONES SUPERFICIALES.	22
2.3.1. El uso de la teoría elástica en la mecánica de suelos.	24
2.3.1.1. Asentamientos elásticos.	25
2.3.1.2. Asentamientos no drenados o inmediatos.	26
2.3.2. Asentamiento por consolidación primaria.	28
2.3.2.1. Compresibilidad del suelo.	34
2.3.2.2. Cálculo del asentamiento edométrico.	36
2.3.3. Asentamiento por consolidación secundaria.	37
2.4. ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT).	38
2.4.1. Equipo.	40
2.4.1.1. Muestreador.	40
2.4.1.2. Varillas.	41
2.4.1.3. Tipos de martillo.	41
2.4.2. Concepto de energía de SPT.	43
2.4.2.1. Medida de la eficiencia de SPT.	45
2.4.3. Correcciones del número de golpes de SPT (N_{SPT}).	48
2.4.3.1. Correcciones de energía.	48
2.4.3.2. Correcciones por el nivel de esfuerzo.	49
2.4.4. Aplicación del ensayo de SPT.	51
2.4.5. Aplicación de resultados.	54

2.4.6. Correlaciones de parámetros geotécnicos en base a SPT.	56
2.4.6.1. Propiedades de suelos granulares.	56
2.4.6.2. Propiedades de suelos finos.	59
2.5. CAPACIDAD PORTANTE DE FUNDACIONES SUPERFICIALES.	61
2.5.1. Tipos de fundación.	64
2.5.1.1. Profundidad de fundación.	67
2.5.1.2. Elección del tipo de fundación.	67
2.5.2. Determinación teórica de capacidad portante última.	68
2.5.2.1. Fórmula general de capacidad portante última.	68
2.5.3. Tipos de fallas.	71
2.5.3.1. Falla por rotura general.	72
2.5.3.2. Falla por punzonamiento.	73
2.5.3.3. Falla por rotura local.	74
2.5.4. Método de los estados límite.	75
2.5.4.1. Factores de seguridad.	77
2.5.4.2. Asentamientos admisibles en fundaciones superficiales.	79
2.5.4.3. Capacidades portantes admisibles para fundaciones superficiales.	80
2.5.5. Métodos de capacidad portante.	81
2.5.5.1. Método de Meyerhof.	83
2.5.5.2. Método de Hansen.	87
2.5.5.3. Método de Bowles.	92
2.5.5.4. Método de Lambe.	94
2.5.5.5. Método de Hough.	95
2.5.6. Criterio para la elección de la ecuación utilizada para la determinación de la capacidad portante última.	97
2.5.7. Corrección por nivel freático.	99

CAPÍTULO III

TRATAMIENTO DE DATOS Y CÁLCULOS

	Página
3.1. UBICACIÓN.	102

3.2. OBTENCIÓN DE DATOS.	103
3.2.1. Ensayo de penetración estándar SPT.	104
3.2.1.1. Resistencia a la penetración.	104
3.2.1.2. Mediciones de tiempo de caída del martillo.	105
3.2.2. Caracterización de suelos.	105
3.3. PROCESAMIENTO DE DATOS.	107
3.3.1. Eficiencia del equipo de SPT.	107
3.3.1.1. Aproximación del factor de eficiencia del martillo.	107
3.3.1.2. Eficiencia de energía del equipo.	108
3.3.2. Correcciones de resistencia a la penetración.	111
3.3.3. Correlaciones de SPT.	114
3.3.4. Capacidad portante.	120
3.3.5. Resultados y análisis.	139

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

	Página
4.1. CONCLUSIONES.	151
4.2. RECOMENDACIONES.	152

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

Anexo 1. Informe fotográfico general.

Anexo 2. Planillas de caracterización y clasificación del material.

Anexo 3. Planillas de cálculo de capacidad portante.

Anexo 4. Planillas de peso específico relativo.

Anexo 5. Planillas de ensayo de penetración estándar (SPT).

Anexo 6. Otros.

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1.1. Fuerzas inter-granulares actuando sobre la superficie X-X.	7
Figura 2.1.2. Esquema de fuerzas inter-granulares.	8
Figura 2.1.3. Analogía del resorte para la consolidación del suelo.	10
Figura 2.1.4. Analogía del resorte en descarga.	11
Figura 2.2.1. Fuerzas que surgen al deslizamiento entre partículas.	15
Figura 2.2.2. Esquema de corte de la caja de corte directo.	16
Figura 2.2.3. Falla típica de suelos frágiles.	19
Figura 2.2.4. Criterio típico de falla pico.	20
Figura 2.2.5. Falla típica de suelos dúctiles.	20
Figura 2.2.6. Criterio típico de falla crítica.	21
Figura 2.2.7. Envolvente de falla para la condición $\phi = 0$, según el círculo de Mohr para un ensayo triaxial UU.	22
Figura 2.3.1. Asentamiento por consolidación primaria.	29
Figura 2.3.2. Historia de esfuerzos en una masa de suelo.	31
Figura 2.3.3. Curva de consolidación del suelo, índice de vacíos e vs. esfuerzo efectivo vertical $\sigma'v$.	33
Figura 2.3.4. Curva de consolidación del suelo, $\xi(\%)$ vs. esfuerzo efectivo vertical $\sigma'v$.	34
Figura 2.3.5. Asentamiento por consolidación secundaria.	37
Figura 2.4.1. Sección longitudinal y transversal de un tomamuestras SPT.	40
Figura 2.4.2. Tipos de martillo de SPT.	42
Figura 2.4.3. Esquema del proceso de penetración para un instante inicial y final.	44
Figura 2.4.4. Resultado típico de 4 ensayos de SPT en una única zona.	55
Figura 2.4.5. Interpretación de la variabilidad de resultados de SPT.	55
Figura 2.4.6. Resistencia al corte no drenado para arcillas insensibles.	59
Figura 2.5.1. Esfuerzo de la fundación transmitida al suelo en función del tiempo.	63
Figura 2.5.2. Relación entre carga y asentamiento de una zapata.	64

Figura 2.5.3. Tipos de cimentación comúnmente empleados.	66
Figura 2.5.4. Solución de Prandtl para terreno no cohesivo, sin peso.	68
Figura 2.5.5. Mecanismo de rotura propuesto por Prandtl para terreno cohesivo puro.	68
Figura 2.5.6. Mecanismo de falla para una zapata de longitud infinita.	69
Figura 2.5.7. Falla por rotura general del suelo.	72
Figura 2.5.8. Aplicación de carga en función de los asentamientos.	73
Figura 2.5.9. Falla por punzonamiento del suelo.	73
Figura 2.5.10. Aplicación de carga en función de los asentamientos.	74
Figura 2.5.11. Falla por rotura local del suelo.	74
Figura 2.5.12. Aplicación de carga en función de los asentamientos.	75
Figura 2.5.13. Análisis de estados límites.	76
Figura 2.5.14. Esquema de capacidad portante.	77
Figura 2.5.15. Área equivalente para verificación de estado límite último.	82
Figura 2.5.16. Esquema de fundación tipo.	83
Figura 2.5.17. Método de Meyerhof, campos de líneas de deslizamiento para una fundación continua rugosa.	84
Figura 2.5.18. Definición de la superficie de falla teórica.	88
Figura 2.5.19. Terreno con pendiente en la zona pasiva.	90
Figura 2.5.20. Fundaciones sobre planos inclinados.	91
Figura 2.5.21. Capacidad portante admisible, Bowles (1986).	94
Figura 2.5.22. Capacidad portante admisible, Lambe y Whitman (1969).	95
Figura 2.5.23. Capacidad portante admisible asumible, suelos finos.	96
Figura 2.5.24. Capacidad portante admisible asumible, suelos granulares.	97
Figura 2.5.25. Caso I, corrección por efecto del nivel freático.	99
Figura 2.5.26. Caso II, corrección por efecto del nivel freático.	100
Figura 2.5.27. Caso III, corrección por efecto del nivel freático.	101
Figura 3.1.1. Ubicación de las áreas de trabajo.	102
Figura 3.2.1. Esquema de distribución en planta de los pozos para SPT.	103
Figura 3.3.1. Cálculo del tiempo promedio de caída del martillo.	108
Figura 3.3.2. Eficiencia de energía promedio del equipo.	111

Figura 3.3.3. Análisis del ensayo SPT, área 1.	114
Figura 3.3.4. Análisis del ensayo SPT, área 2.	115
Figura 3.3.5. Análisis del ensayo SPT, área 3.	116
Figura 3.3.6. Análisis del ensayo SPT, área 4.	117
Figura 3.3.7. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Hansen para el área 1.	121
Figura 3.3.8. Capacidad portante admisible para zapata rectangular, método de Hansen para el área 1.	122
Figura 3.3.9. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Lambe para el área 1.	122
Figura 3.3.10. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Meyerhof resumido para el área 1.	123
Figura 3.3.11. Capacidad portante admisible para zapata rectangular, método de Meyerhof resumido para el área 1.	124
Figura 3.3.12. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Bowles para el área 1.	124
Figura 3.3.13. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Meyerhof para el área 1.	125
Figura 3.3.14. Capacidad portante admisible para zapata rectangular, método de Meyerhof para el área 1.	126
Figura 3.3.15. Capacidad portante admisible supuesta para zapatas, método de Hough para el área 1.	126
Figura 3.3.16. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Hansen para el área 2.	127
Figura 3.3.17. Capacidad portante admisible para zapata rectangular, método de Hansen para el área 2.	128
Figura 3.3.18. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Meyerhof para el área 2.	129
Figura 3.3.19. Capacidad portante admisible para zapata rectangular, método de Meyerhof para el área 2.	129

Figura 3.3.20. Capacidad portante admisible supuesta para zapatas, método de Hough para el área 2.	130
Figura 3.3.21. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Hansen para el área 3.	131
Figura 3.3.22. Capacidad portante admisible para zapata rectangular, método de Hansen para el área 3.	131
Figura 3.3.23. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Meyerhof para el área 3.	132
Figura 3.3.24. Capacidad portante admisible para zapata rectangular, método de Meyerhof para el área 3.	132
Figura 3.3.25. Capacidad portante admisible supuesta para zapatas, método de Hough para el área 3.	133
Figura 3.3.26. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Hansen para el área 4.	134
Figura 3.3.27. Capacidad portante admisible para zapata rectangular, método de Hansen para el área 4.	134
Figura 3.3.28. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Lambe para el área 4.	135
Figura 3.3.29. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Meyerhof resumido para el área 4.	136
Figura 3.3.30. Capacidad portante admisible para zapata rectangular, método de Meyerhof resumido para el área 4.	136
Figura 3.3.31. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Bowles para el área 4.	137
Figura 3.3.32. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Meyerhof para el área 4.	138
Figura 3.3.33. Capacidad portante admisible para zapata rectangular, método de Meyerhof para el área 4.	138
Figura 3.3.34. Capacidad portante admisible supuesta para zapatas, método de Hough para el área 4.	139
Figura 3.3.35. Capacidad portante última, área 1.	143

Figura 3.3.36. Capacidad portante última, área 2.	143
Figura 3.3.37. Gráfica representativa de análisis de estados límite, para el método de Meyerhof del área 2.	144
Figura 3.3.38. Variación de capacidad portante admisible para zapatas cuadradas del área 1.	145
Figura 3.3.39. Resultados obtenidos del análisis de capacidad portante admisible de zapatas cuadradas, para la DICYT.	148
Figura 3.3.40. Capacidad portante segura de zapatas cuadradas, para la DICYT.	148
Figura 3.3.41. Resultados obtenidos del análisis de capacidad portante admisible de zapatas rectangulares, para la DICYT.	149
Figura 3.3.42. Capacidad portante segura de zapatas rectangulares, para la DICYT.	150

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 2.1.1. Parámetros de resistencia de esfuerzos efectivos y permeabilidades de un amplio y variado tipo de material.	12
Tabla 2.3.1. Relación de Poisson para distintos materiales.	26
Tabla 2.3.2. Valores del factor de influencia I.	27
Tabla 2.3.3. Correlaciones empíricas para la determinación de parámetros de compresibilidad del suelo.	35
Tabla 2.4.1. Detalle técnico de SPT.	43
Tabla 2.4.2. Influencia del tipo de martillo en la eficiencia del equipo.	47
Tabla 2.4.3. Cálculo de valores típico de CN.	49
Tabla 2.4.4. Sistema de clasificación de suelos y rocas en base a SPT.	50
Tabla 2.4.5. Número de puntos de investigación.	52
Tabla 2.4.6. Aplicación y limitaciones de ensayo.	53
Tabla 2.4.7. Ángulos de fricción interna típicos.	58
Tabla 2.4.8. Ángulos de fricción interna para arenas.	58
Tabla 2.4.9. Rango típico del módulo de Young en función a SPT.	58
Tabla 2.4.10. Módulo de Young, para suelos granulares.	59
Tabla 2.4.11. Cohesiones no drenadas para arcillas.	60
Tabla 2.4.12. Módulo de Young no drenado, para suelos finos.	61
Tabla 2.5.1. Clasificación de fundaciones superficiales para diferentes relaciones.	65
Tabla 2.5.2. Tipos de fundaciones.	65
Tabla 2.5.3. Factor de seguridad mínimo para zapatas.	78
Tabla 2.5.4. Criterios tradicionales sobre asentamientos admisibles.	79
Tabla 2.5.5. Asentamientos generales admisibles, Norma MV-101.	80
Tabla 2.5.6. Asentamientos admisibles, Norma TGL 11464 (1972).	80
Tabla 2.5.7. Capacidad portante admisible aproximada, después de BS 8004:1986.	81
Tabla 2.5.8. Factores F.	93

Tabla 2.5.9. Comparación de valores de capacidad portante última entre métodos semi-empíricos y valores experimentales obtenidos por Milovic (1965) y Muhs.	98
Tabla 2.5.10. Criterio para la elección de ecuaciones.	99
Tabla 3.1.1. Ubicación geográfica de las áreas de trabajo.	103
Tabla 3.2.1. N_{SPT} , medidos en campo.	104
Tabla 3.2.2. Tiempos cronometrados de caída del martillo.	105
Tabla 3.2.3. Clasificación del suelo.	106
Tabla 3.3.1. Distribución de probabilidad normal del tiempo de caída del martillo.	107
Tabla 3.3.2. Eficiencia de energía del martillo.	108
Tabla 3.3.3. Datos técnicos del equipo de penetración estándar.	108
Tabla 3.3.4. Eficiencias por transferencia de energía.	109
Tabla 3.3.5. Eficiencias por transferencia de energía.	109
Tabla 3.3.6. Eficiencia de energía del equipo transmitida al suelo.	110
Tabla 3.3.7. Densidades relativas para suelos granulares.	111
Tabla 3.3.8. Factor de corrección C_N .	112
Tabla 3.3.9. Resistencia a la penetración corregida.	113
Tabla 3.3.10. Interpretación de datos SPT, área 1.	114
Tabla 3.3.11. Interpretación de datos SPT, área 2.	115
Tabla 3.3.12. Interpretación de datos SPT, área 3.	116
Tabla 3.3.13. Interpretación de datos SPT, área 4.	117
Tabla 3.3.14. Parámetros de rigidez calculados, área 1.	118
Tabla 3.3.15. Parámetros de rigidez calculados, área 4.	118
Tabla 3.3.16. Parámetros de rigidez calculados, área 2.	118
Tabla 3.3.17. Parámetros de rigidez calculados, área 3.	118
Tabla 3.3.18. Parámetros de rigidez calculados, área 4 ($Df = 1$ m).	119
Tabla 3.3.19. Nivel de sobre consolidación.	119
Tabla 3.3.20. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Hansen para el área 1.	121
Tabla 3.3.21. Capacidad portante admisible para zapata rectangular, método	

de Hansen para el área 1.	121
Tabla 3.3.22. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Lambe para el área 1.	122
Tabla 3.3.23. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Meyerhof resumido para el área 1.	123
Tabla 3.3.24. Capacidad portante admisible para zapata rectangular, método de Meyerhof resumido para el área 1.	123
Tabla 3.3.25. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Bowles para el área 1.	124
Tabla 3.3.26. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Meyerhof para el área 1.	125
Tabla 3.3.27. Capacidad portante admisible para zapata rectangular, método de Meyerhof para el área 1.	125
Tabla 3.3.28. Capacidad portante admisible supuesta para zapatas, método de Hough para el área 1.	126
Tabla 3.3.29. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Hansen para el área 2.	127
Tabla 3.3.30. Capacidad portante admisible para zapata rectangular, método de Hansen para el área 2.	127
Tabla 3.3.31. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Meyerhof para el área 2.	128
Tabla 3.3.32. Capacidad portante admisible para zapata rectangular, método de Meyerhof para el área 2.	128
Tabla 3.3.33. Capacidad portante admisible supuesta para zapatas, método de Hough para el área 2.	129
Tabla 3.3.34. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Hansen para el área 3.	130
Tabla 3.3.35. Capacidad portante admisible para zapata rectangular, método de Hansen para el área 3.	130
Tabla 3.3.36. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Meyerhof para el área 3.	131

Tabla 3.3.37. Capacidad portante admisible para zapata rectangular, método de Meyerhof para el área 3.	132
Tabla 3.3.38. Capacidad portante admisible supuesta para zapatas, método de Hough para el área 3.	133
Tabla 3.3.39. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Hansen para el área 4.	133
Tabla 3.3.40. Capacidad portante admisible para zapata rectangular, método de Hansen para el área 4.	134
Tabla 3.3.41. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Lambe para el área 4.	135
Tabla 3.3.42. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Meyerhof resumido para el área 4.	135
Tabla 3.3.43. Capacidad portante admisible para zapata rectangular, método de Meyerhof resumido para el área 4.	136
Tabla 3.3.44. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Bowles para el área 4.	137
Tabla 3.3.45. Capacidad portante admisible para zapata cuadrada, método de Meyerhof para el área 4.	137
Tabla 3.3.46. Capacidad portante admisible para zapata rectangular, método de Meyerhof para el área 4.	138
Tabla 3.3.47. Capacidad portante admisible supuesta para zapatas, método de Hough para el área 4.	139
Tabla 3.3.48. Comparación de eficiencia de energía.	140
Tabla 3.3.49. Resumen de parámetros de rigidez del suelo.	140
Tabla 3.3.50. Clasificación del suelo según SPT.	141
Tabla 3.3.51. Tipos de falla probables de las fundaciones.	142
Tabla 3.3.52. Capacidad portante última, área 1.	142
Tabla 3.3.53. Capacidad portante última, área 2.	142
Tabla 3.3.54. Análisis de estados límite, para el método de Meyerhof del área 2.	144

Tabla 3.3.55. Variación de resultados de capacidad portante admisible para zapatas cuadradas del área 1.	145
Tabla 3.3.56. Resistencia a la penetración corregida, para la DICYT.	146
Tabla 3.3.57. Interpretación de datos de SPT, para la DICYT.	147
Tabla 3.3.58. Parámetros de rigidez calculados, para la DICYT.	147
Tabla 3.3.59. Resultados obtenidos del análisis de capacidad portante admisible de zapatas cuadradas, para la DICYT.	147
Tabla 3.3.60. Capacidad portante segura de zapatas cuadradas, para la DICYT.	148
Tabla 3.3.61. Resultados obtenidos del análisis de capacidad portante admisible de zapatas rectangulares, para la DICYT.	149
Tabla 3.3.62. Capacidad portante segura de zapatas rectangulares, para la DICYT.	149
Tabla 3.3.63. Estados límites para DICYT, zapata cuadrada.	150