

ÍNDICE GENERAL

1. Capítulo I: Introducción	15
1.1 Definición del problema y propuesta.....	15
1.2 Delimitaciones	16
1.2.1 Espacio	16
1.2.2 Tiempo.....	17
1.3 Objetivos.....	17
1.3.1 Objetivo General.....	17
1.3.2 Objetivo Específicos.....	18
1.4 Alcances del proyecto.....	18
2. Capítulo II: Marco teórico	19
2.1 Depósito de relaves.....	19
2.1.1 Manejo y clasificación.....	19
2.1.2 Embalse de relave	21
2.1.3 Descarga de relaves	21
2.2 Caracterización geotécnica de suelos	22
2.2.1 Introducción.....	23
2.2.2 Relación de vacíos (e).....	24
2.2.3 Densidad relativa (D_r).....	24
2.2.4 Grado de saturación (S_R)	25
2.2.5 Contenido de humedad (ω).....	26
2.2.6 Peso específico de los sólidos (G_s).....	26
2.3 Método de ensayo estándar para límite líquido, plástico e índice de plasticidad de suelos	27
2.4 Resistencia al corte del suelo.....	29

2.4.1 Resistencia al corte drenado	29
2.4.2 Resistencia al corte no drenado (S_u)	30
2.5 Ensayo de veleta de corte manual (VST)	32
2.5.1 Veleta de corte manual	34
3. Capítulo III: Metodología.....	38
3.1 Introducción.....	38
3.2 Metodología.....	38
3.2.1 Recopilación de información.....	39
3.2.2 Ubicación e identificación del terreno.....	39
3.2.3 Extracción de muestras de laboratorio	39
3.2.4 Resultados y análisis obtenidos	40
3.3 Ensayos y normativas	40
4. Capítulo IV: Análisis de resultados	41
4.1 Caracterización geotécnica	41
4.1.1 Clasificación por granulometría	41
4.1.2 Sistema para registro de carga aplicada.....	43
4.1.3 Muestreo	44
4.1.4 Densidades mínimas y máxima	45
4.2 Resistencia al corte en arena.....	49
4.2.1 Resistencia al corte en arena no perturbada ($S_{u, Max}$).....	49
4.2.2 Resistencia al corte en arena perturbada ($S_{u, Residual}$).....	56
4.3 Resistencia al corte en limos	64
4.3.1 Resistencia al corte en limos no perturbados ($S_{u, Max}$).....	65
4.3.2 Resistencia al corte en limos perturbados ($S_{u, Residual}$).....	67
4.4 Resistencia al corte en relaves convencionales	69

4.4.1 Resistencia al corte en material no perturbado ($S_{u, \text{Max}}$)	71
4.4.2 Resistencia al corte en material perturbado ($S_{u, \text{Residual}}$).....	73
4.5 Factor de corrección (<i>Bjerrum</i>)	74
4.6 Comparación global de arena, fino y relave	76
4.7 Ensayo sobre material estratificado	79
5. Conclusión	83
6. Bibliografía.....	85
7. Anexos	87
7.1 Relación peso-volumen, granulometría material arena	87
7.2 Relación peso-volumen, granulometría y plasticidad material fino proveniente de antiguo relave	88
7.3 Relación peso-volumen, granulometría y plasticidad material relave.....	91
7.4 Torque <i>peak</i> vs residual arena	95
7.5 Torque <i>peak</i> vs residual material fino	97
7.6 Torque <i>peak</i> vs residual material relave	97
7.7 Resistencia al corte no drenado en relave proveniente de embalse de relave Chépica	98

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1 Ubicación geográfica del embalse de relave mina Chépica (Google Earth Pro, 2020).....	16
Ilustración 1-2 Mapa mina Chépica con sus principales instalaciones (Google Earth Pro, 2020).....	17
Ilustración 2-1 Embalse Enami Vallenar (Sernageomin, 2017).....	20
Ilustración 2-2 Etapa de construcción de embalse de relaves (Propia, 2020)	21
Ilustración 2-3 Descarga de relaves en mina Chépica (Propia, 2020).....	22
Ilustración 2-4 Suelo con Fases y elementos en estado natural (Das, 2015).....	23
Ilustración 2-5 Estado tensional en la veleta (Chandler, 1988).....	31
Ilustración 2-6 Envoltente de falla de la resistencia (Propia, 2020)	31
Ilustración 2-7 Momento resistente de la fuerza cortante (Braja M. Das, 2015)	33
Ilustración 2-8 Geometría de la veleta de campo (ASTM, 1992)	35
Ilustración 4-1 Granulometría por tamizado sobre suelo de relave (Propia, 2020).....	42
Ilustración 4-2 Toma de temperatura para obtener el volumen del molde 1 (Propia, 2020) 43	
Ilustración 4-3 Calibración molde 1 método geométrico (Propia, 2020).....	44
Ilustración 4-4 Tamizado de arena fina en malla n°10 (Propia, 2020).....	44
Ilustración 4-5 Remanente no apto para las pruebas realizadas (Propia, 2020).....	45
Ilustración 4-6 Peso de la muestra húmeda del depósito de relaves (Propia, 2020).....	46
Ilustración 4-7 Determinación de densidad mínima (Propia, 2020).....	47
Ilustración 4-8 Determinación de densidad máxima seca (Propia, 2020)	48
Ilustración 4-9 Preparando arena sobre el recipiente e ingreso de veleta (Propia, 2020).....	50
Ilustración 4-10 Homogeneización del suelo arenoso (Propia, 2020).....	53
Ilustración 4-11 Ensayos de veleta con arena $S_R = 100\%$ (Propia, 2020).....	55
Ilustración 4-12 Secuencia de ruptura de material y obtención del torque máximo en limos (Propia, 2020).....	68
Ilustración 4-13 Gráfica densidad relativa vs $S_{u, \max}$ (Corregido)	81
Ilustración 4-14 Gráfica densidad relativa vs $S_{u, \text{residual}}$ (Corregido)	81
Ilustración 7-1 Tabla carta de plasticidad de ambas muestras de relave y fino (Propia, 2020)	94
	X

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Densidad de un suelo granular	25
Tabla 2-2 Dimensiones de veleta de corte manual	35
Tabla 4-1 Torque máximo - $S_R = 0\%$ $D_r = 0\%$	51
Tabla 4-2 Resistencia al corte no drenado máximo $S_R = 0\%$	52
Tabla 4-3 Resistencia al corte no perturbado $S_R = 40\%$	53
Tabla 4-4 Resistencia al corte no perturbado $S_R = 70\%$	54
Tabla 4-5 Resistencia al corte no perturbado $S_R = 100\%$	56
Tabla 4-6 Resistencia al corte perturbado $S_R = 0\%$	57
Tabla 4-7 Resistencia al corte perturbado $S_R = 40\%$	58
Tabla 4-8 Resistencia al corte perturbado $S_R = 70\%$	59
Tabla 4-9 Resistencia al corte perturbado $S_R = 100\%$	60
Tabla 4-10 Propiedades de plasticidad limo	65
Tabla 4-11 Resistencia al corte $S_{u, Max}$ en limos	66
Tabla 4-12 Resistencia al corte $S_{u, Residual}$ en limos	68
Tabla 4-13 Densidades del depósito de relave	70
Tabla 4-14 Propiedades de plasticidad del relave	71
Tabla 4-15 Obtención de humedad de relave en terreno	72
Tabla 4-16 Resistencia al corte $S_{u, Max}$ en relave	72
Tabla 4-17 Resistencia al corte $S_{u, Residual}$ en relave	73
Tabla 4-18 Factor de corrección (Bjerrum) para materiales	75
Tabla 4-19 Resistencia al corte no drenado para material fino	75
Tabla 4-20 Resistencia al corte no drenado para relave	76
Tabla 4-21 Grado de saturación Promedio	80
Tabla 4-22 Resistencia al corte en 50% de materiales fino y relave	80
Tabla 7-1 Análisis granulométrico material arena	87
Tabla 7-2 Densidad mínima arena	87
Tabla 7-3 Densidad máxima arena	88
Tabla 7-4 Densidad relativa arena	88

Tabla 7-5 Análisis granulométrico material fino proveniente de antiguo relave	89
Tabla 7-6 Densidad mínima material fino proveniente de antiguo relave	89
Tabla 7-7 Densidad máxima material fino proveniente de antiguo relave.....	90
Tabla 7-8 Densidad relativa material fino proveniente de antiguo relave.....	90
Tabla 7-9 Límites de plasticidad material fino proveniente de antiguo relave	91
Tabla 7-10 Análisis granulométrico relave	91
Tabla 7-11 Densidad mínima relave.....	92
Tabla 7-12 Densidad máxima relave	92
Tabla 7-13 Densidad relativa relave.....	93
Tabla 7-14 Límites de plasticidad material relave.....	93
Tabla 7-15 Clasificación USCS.....	94
Tabla 7-16 Resistencia peak vs residual a distintas densidades relativa en arena saturada 0%	95
Tabla 7-17 Resistencia peak vs residual a distintas densidades relativa en arena saturada 40%	95
Tabla 7-18 Resistencia peak vs residual a distintas densidades relativa en arena saturada 70%	96
Tabla 7-19 Resistencia peak vs residual a distintas densidades relativa en arena saturada 100%	96
Tabla 7-20 Resistencia peak vs residual a distintas densidades relativa en limo saturado 43,29%	97
Tabla 7-21 Resistencia peak vs residual a distintas densidades relativa en relave saturado 31,61%	97
Tabla 7-22 Resistencia al corte no drenado en relave Chépica	98
Tabla 7-23 Resistencia al corte no drenado en material estratificado	98

Índice de Gráficas

Gráfica 2-1 Factor de corrección para prueba de resistencia al corte en veleta	37
Gráfica 4-1 Curva granulométrica sobre arena.....	42
Gráfica 4-2 Densidad Seca v/s Densidad relativa	48
Gráfica 4-3 Torque peak S_R 0% D_r 0% - Arena	51
Gráfica 4-4 Torque máximo para saturación (S_R) 0% Arena	52
Gráfica 4-5 Torque máximo para saturación (S_R) 40% Arena	54
Gráfica 4-6 Torque máximo para saturación (S_R) 70% Arena	55
Gráfica 4-7 Torque máximo para saturación (S_R) 100% Arena	56
Gráfica 4-8 Torque residual para saturación (S_R) 0% Arena.....	57
Gráfica 4-9 Torque residual para saturación (S_R) 40% Arena.....	58
Gráfica 4-10 Torque residual para saturación (S_R) 70% Arena.....	59
Gráfica 4-11 Torque residual para saturación (S_R) 100% Arena.....	60
Gráfica 4-12 Variación de la resistencia al corte no drenado máximo y residual vs densidad, S_R 0% para arena	61
Gráfica 4-13 Variación de la resistencia al corte no drenado máximo y residual vs humedad, S_R 40% para arena	62
Gráfica 4-14 Variación de la resistencia al corte no drenado máximo y residual vs humedad, S_R 70% para arena	63
Gráfica 4-15 Variación de la resistencia al corte no drenado máximo y residual vs humedad, S_R 100% para arena	64
Gráfica 4-16 Límite líquido material limo	65
Gráfica 4-17 Torque Peak para saturación (S_R) 43,29% Limo.....	66
Gráfica 4-18 Torque residual para saturación (S_R) 43,29% Limo.....	69
Gráfica 4-19 Granulometría global.....	70
Gráfica 4-20 Límite líquido material relave	71
Gráfica 4-21 Torque peak para saturación (S_R) 31,61% Relave	73
Gráfica 4-22 Torque residual para saturación (S_R) 31,61% Relave	74
Gráfica 4-23 Comparación porcentaje de error S_u (corregido).....	75

Gráfica 4-24 Comparativa Global de densidad relativa vs $S_{u, \text{Max}}$ (corregido)	77
Gráfica 4-25 Comparativa Global de densidad relativa vs $S_{u, \text{Residual}}$ (corregido).....	78