

# TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.1.1.	Objetivos Generales .....	2
1.1.2.	Objetivos Específicos .....	2
1.2.	Organización de la Tesis.....	2
2	Revisión Bibliográfica .....	3
2.1	Propiedades dinámicas de los suelos .....	3
2.1.1	Introducción .....	3
2.1.2	Ondas sísmicas .....	3
2.1.3	Módulo de corte .....	5
2.1.4	Amortiguamiento.....	7
2.1.5	Parámetros que afectan el módulo de corte y el amortiguamiento .....	8
2.2	Ensayos dinámicos de los suelos .....	14
2.2.1	Métodos Geofísicos .....	15
2.2.2	Bender Element .....	15
2.2.3	Columna Resonante .....	16
2.2.4	Ensayo Triaxial Cíclico .....	16
2.2.5	Corte simple cíclico.....	17
2.3	Resumen.....	17
3	Suelo ensayado, equipos y metodología .....	18
3.1	Suelo ensayado .....	18
3.1.1	Clasificación geotécnica del suelo ensayado .....	18
3.2	Metodología de Ensayos .....	20
3.2.1	Programa de Ensayos .....	20
3.2.2	Preparación de Probetas .....	21
3.3	Equipos utilizados, montaje y ensayo .....	23
3.3.1	Bender Element .....	23
3.3.2	Columna Resonante .....	26
4	Presentación y Análisis de Resultados .....	32
4.1	Módulo de rigidez al corte inicial .....	32
4.1.1	Ensayos de Bender Element .....	32
4.1.2	Ensayo de columna resonante .....	39
4.1.3	Módulo de rigidez al corte “ $G_{max}$ ” y del amortiguamiento “D” a pequeñas y medianas deformaciones. ....	43
5	Análisis y conclusiones .....	53
6	Bibliografía .....	57
7	Anexos .....	60
7.1	Caracterización de arena de relave El Torito. ....	60
7.1.1	Granulometría.....	60
7.1.2	Hidrometría .....	62
7.1.3	Peso específico .....	65
7.1.4	Densidades mínima y máxima.....	67
7.1.5	Proctor Modificado.....	69
7.1.6	Densidad Relativa DR [%]. ....	70

7.2	Bender Element .....	71
7.2.1	Generador de señales y su manejo .....	71
7.2.2	Osciloscopio digital y su manejo.....	72
7.3	Columna Resonante.....	73
7.3.1	Obtención de Parámetro de Rigidez (G).....	73
7.3.2	Obtención de Parámetro de Deformación Torsional.....	77
7.3.3	Calibración. Obtención de parámetro de inercia “ $I_0$ ” .....	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1.-Tipos de ondas sísmicas.....	4
Figura 2. 2.-Diagrama tensión-deformación en un material lineal (Santibañez, 2006). ....	5
Figura 2. 3.- Diagrama tensión-deformación de un material no lineal (Santibañez, 2006). .....	5
Figura 2. 4.-Degradación de rigidez y amortiguamiento respecto la deformación al corte (Z. Wu, 2014). ....	6
Figura 2. 5.-Límites “ $\gamma_t^e$ ” y “ $\gamma_t^v$ ” para distintas plasticidades de material (Vucetic, 1994) ..	7
Figura 2. 6.-Obtención del amortiguamiento (Ishihara, 1996) .....	7
Figura 2. 7.- “ $G_{max}$ ” vs grado de saturación “ $S_r$ ”. (S. Wu, Gray, & Richart Jr, 1984).....	9
Figura 2. 8.- “ $G_{max}$ ” o “ $G_0$ ” con respecto a “ $e$ ” y “ $\sigma'_c$ ” para arenas secas redondeadas (líneas continuas) y angulares (líneas discontinuas) (Hardin & Richart, (1963); adaptado). .....	11
Figura 2. 9.-Degradación de rigidez y amortiguamiento respecto al tipo de suelo.(Seed, Wong, Idriss, & Tokimatsu, 1986) .....	11
Figura 2. 10.-“ $G/G_{max}$ ” y “ $D$ ” respecto el confinamiento efectivo “ $\sigma'_c$ ” para arena remoldeada (Stokoe, 1993). ....	12
Figura 2. 11.- “ $G/G_{max}$ ” y “ $D$ ” con respecto al índice de vacíos para arena de Toyoura (Kokusho, 1980). ....	12
Figura 2. 12.-“ $G/G_{max}$ ” con respecto a la deformación por corte, para distintos índices de plasticidad. ....	13
Figura 2. 13.- a) Esquema del ensayo triaxial cíclico. b) Curva histerética y obtención de resultados (Ishihara, 1996). ....	16
Figura 2. 14.-a) Esquema del ensayo de corte simple cíclico. b) Curva histerética y obtención de resultados. (Ishihara, 1996) .....	17
Figura 3. 1.-Sector de extracción de la arena de relaves estudiada.....	18
Figura 3. 2.-Distribución granulométrica y foto al microscopio del material estudiado. ...	19
Figura 3. 3.- Materiales de confección de probetas.....	22
Figura 3. 4.-Equipo Bender Element (Camacho-Tauta et al., 2012). ....	24
Figura 3. 5.-Elemento piezoeléctrico y Bender Element.....	24
Figura 3. 6.-Pantalla osciloscopio digital. Obtención de tiempo de llegada de onda “ $tt$ ”.	25
Figura 3. 7.-Sistema electromagnético. Ensayo a torsión (Izquierda); Ensayo a flexión (Derecha).(GDS Instruments., 2010).....	26
Figura 3. 8.-Equipo de columna resonante.....	27
Figura 3. 9.-Forma correcta de poner papel filtro y piedras porosas sobre los cap superior e inferior. ....	29

Figura 3. 10.-Montaje de Columna Resonante. N°1: Paso 1. N° 2: Pasos 2 a 4, donde la flecha indica la conexión de un tubo de drenaje. N°3: Pasos 5 a 6, donde las flechas indican las conexiones de bobinas. N°4: Paso 7, donde la flecha indica la conexión del acelerómetro. N° 5: Pasos 8 a 10. N° 6: Paso 11. ....	29
Figura 3. 11.-Curva de amortiguación (GDS Instruments., 2010). ....	30
Figura 4. 1.-Ensayos de Bender Element para “DR <sub>o</sub> ” 35%. Tiempo de llegada de onda “tt” .....	32
Figura 4. 2.- Ensayos Bender Element para “DR <sub>o</sub> ” 50%. Tiempo de llegada de onda “tt”. ....	33
Figura 4. 3.- Ensayos de Bender Element para “DR <sub>o</sub> ” 70%. Tiempo de llegada de onda “tt” .....	34
Figura 4. 4.- Ensayos de Bender Element para “DR <sub>o</sub> ” 85%. Tiempo de llegada de onda “tt” .....	35
Figura 4. 5.-Módulo de rigidez máxima “G <sub>max</sub> ” versus índice de vacíos “e” por confinamiento. Bender Element. ....	37
Figura 4. 6.- Módulo de rigidez máxima “G <sub>max</sub> ” versus confinamiento por densidad relativa. Bender Element.....	38
Figura 4. 7.- Velocidad de onda de corte “V <sub>s</sub> ” versus índice de vacíos “e” por confinamiento. Bender Element. ....	38
Figura 4. 8.- Módulo de rigidez máxima “G <sub>max</sub> ” versus índice de vacíos “e” por confinamiento. Columna resonante.....	41
Figura 4. 9.- Módulo de rigidez máxima “G <sub>max</sub> ” versus confinamiento por densidad relativa. Columna resonante. ....	41
Figura 4. 10.- Velocidad de onda de corte “V <sub>s</sub> ” versus índice de vacíos “e” por confinamiento. Columna resonante.....	42
Figura 4. 11.-Comparación de “G <sub>max</sub> ” de ensayos de columna resonante CR y Bender Element BE. ....	43
Figura 4. 12.-Ensayo columna resonante para “DR <sub>o</sub> ” del 35% por confinamiento para material saturado.....	44
Figura 4. 13.- Ensayo columna resonante para “DR <sub>o</sub> ” del 50% por confinamiento para material saturado.....	45
Figura 4. 14.- Ensayo columna resonante para “DR <sub>o</sub> ” del 70% por confinamiento para material saturado.....	46
Figura 4. 15.- Ensayo columna resonante para “DR <sub>o</sub> ” del 85% por confinamiento para material saturado.....	47
Figura 4. 16.- Ensayo columna resonante 1[kg/cm <sup>2</sup> ] de confinamiento por distintas “DR <sub>o</sub> ”. Material saturado.....	49
Figura 4. 17.- Ensayo columna resonante para “DR <sub>o</sub> ” del 70% por confinamiento para muestra al 5% de saturación.....	50
Figura 4. 18.-Ensayos de arena saturada respecto a muestras al 5% de S <sub>r</sub> ” para “DR <sub>o</sub> ” del 70%. ....	52
Figura 5. 1.-Resultados de memoria comparados con resultados históricos, para “σ’ <sub>c</sub> ” = 1kg/cm <sup>2</sup> .(Khouri, 1984).....	55
Figura 7. 1.-Distribución granulométrica de arena del muro del tranque de relaves "El torito" .....	65
Figura 7. 2.-Ensayo proctor modificado.....	69

Figura 7. 3.-Generador de señales.....	71
Figura 7. 4.-Osciloscopio digital. ....	72
Figura 7. 5.-Ondas torsionales en un elemento diferencial de suelo.....	73
Figura 7. 6.- Obtención del parámetro “ $\theta$ ” . ....	78
Figura 7. 7.-Barras de calibración. ....	78
Figura 7. 8.-Obtención de “ $I_o$ ” .....	79

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2. 1.-Parámetros que afectan la resistencia al corte y amortiguamiento.(Hardin & Drnevich, 1972) .....	8
Tabla 2. 2.- Constantes de ecuaciones de “ $G_{max}$ ” (Ishihara, (1996) & Kokusho, (1981))	10
Tabla 3. 1.- Caracterización geotécnica de arena de relaves.....	19
Tabla 3. 2.-Programa de ensayos. ....	20
Tabla 7. 1.-Granulometría 1. ....	60
Tabla 7. 2.-Granulometría 2. ....	61
Tabla 7. 3.-Granulometría 3. ....	61
Tabla 7. 4.-Granulometría 4. ....	61
Tabla 7. 5.-Granulometría 5. ....	62
Tabla 7. 6.-Parámetro A. Norma ASTM D422. ....	63
Tabla 7. 7.-Hidrometría 1. ....	63
Tabla 7. 8.-Hidrometría 2. ....	64
Tabla 7. 9.-Peso específico 1. ....	66
Tabla 7. 10.- Peso específico 2. ....	66
Tabla 7. 11.- Peso específico 3. ....	66
Tabla 7. 12.- Peso específico 4. ....	66
Tabla 7. 13.- Peso específico 5. ....	67
Tabla 7. 14.-Densidad mínima del material usando método por deposición lenta. ....	68
Tabla 7. 15.-Densidad máxima del material usando método japonés. ....	68
Tabla 7. 16.-Ensayo proctor modificado. En amarillo está la densidad máxima.....	69
Tabla 7. 17.-Tabla de densidad relativa. ....	70
Tabla 7. 18.- Valores de “ $\beta$ ” comúnmente encontrados para “ $I/I_o$ ” .....	76
Tabla 7. 19.-Inercias barras de calibración y pesos. ....	80
Tabla 7. 20.-Cálculos para la obtención de “ $I_o$ ” .....	80