

---

# ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN.....  | 1  |
| 1.1 Definición del problema .....   | 1  |
| 1.2 Objetivos .....   | 2  |
| 1.2.1 Objetivo General .....  | 2  |
| 1.2.2 Objetivo Específico .....   | 2  |
| 1.3 Alcances.....   | 2  |
| 2. MARCO TEÓRICO.....   | 4  |
| 2.1 Relave .....  | 4  |
| 2.1.1 Consideraciones de seguridad para trabajar sobre un tranque de relave.....              | 6  |
| 2.2 Opciones para la descarga de los relaves .....  | 8  |
| 2.3 Estado de acomodo de las partículas en playa de relave .....                              | 9  |
| 2.3.1 Densidad relativa .....   | 9  |
| 2.4 Capacidad de soporte de un suelo.....   | 12 |
| 2.4.1 Capacidad de carga de Terzagui .....  | 13 |
| 2.4.2 Capacidad de carga de Meyerhof .....  | 13 |
| 2.4.3 Estudio capacidad de carga de Ashutosh Trivedi .....                                    | 15 |
| 2.5 Relación entre la densidad relativa (DR) y el ángulo de fricción de suelo ( $\phi$ )..... | 17 |
| 2.6 Comportamiento energético de un suelo.....  | 18 |
| 2.6.1 Asentamiento en suelo.....  | 18 |
| 2.6.1.1 Asentamiento Inmediato .....  | 19 |
| 3. METODOLOGÍA.....   | 20 |
| 3.1 Materiales.....   | 22 |
| 3.2 Ensayo densidades .....   | 22 |
| 3.3 Hundimiento por impacto .....   | 23 |

---

|   |    |
|---|----|
| 3.4 Desarrollo de capacidad de carga lenta experimental.....            | 24 |
| 3.5 Capacidad de carga última.....                                      | 25 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....   | 26 |
| 4.1 Densidad mínima y máxima .....                                      | 26 |
| 4.2 Densidad relativa.....  | 26 |
| 4.3 Hundimiento .....   | 27 |
| 4.3.1 Hundimiento en arena seca .....                                   | 27 |
| 4.3.2 Hundimiento para arena con humedad igual a 2% .....               | 28 |
| 4.3.3 Hundimiento para arena con humedad igual a 5% .....               | 28 |
| 4.3.4 Hundimiento para arena con humedad igual a 7% .....               | 29 |
| 4.3.5 Hundimiento para arena con humedad igual a 10% .....              | 30 |
| 4.3.6 Hundimiento para arena con humedad igual a 15% .....              | 30 |
| 4.3.7 Relación entre hundimiento y número de caídas .....               | 35 |
| 4.3.8 Relación entre energía de caída y hundimiento ( $R_{E/h}$ ) ..... | 40 |
| 4.4 Capacidad de carga .....  | 47 |
| 4.4.1 Capacidad de carga de Terzagui .....                              | 47 |
| 4.4.2 Capacidad de carga de Meyerhof .....                              | 47 |
| 4.4.3 Capacidad de carga lenta experimental.....                        | 48 |
| 4.4.4 Capacidad de carga experimental vs teórica .....                  | 54 |
| 5. CONCLUSIÓN.....  | 63 |
| RECOMENDACIONES .....   | 64 |
| REFERENCIAS .....   | 65 |
| ANEXOS.....   | 67 |

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 2.1: Modelo tranque de relaves .....   | 5  |
| Ilustración 2.2: Tipos de descarga de relave .....   | 6  |
| Ilustración 2.3: instalación y mantención de geomembrana en depósito de relave .....   | 7  |
| Ilustración 2.4: Depositación de relave .....  | 8  |
| Ilustración 2.5: Descripción del suelo según la densidad relativa .....  | 12 |
| Ilustración 2.6: Naturaleza de falla en un suelo por capacidad de carga.....   | 12 |
| Ilustración 2.7: Gráfico con tipo de falla probable en arena, dependiendo de su<br>compacidad relativa y la relación $D_f/B^*$ .....           | 15 |
| Ilustración 2.8: variación de la capacidad de soporte con distintas cantidades de finos<br>para los diferentes valores de $d/D$ .....          | 16 |
| Ilustración 2.9: Variación de la capacidad de soporte, $S/D$ (%) según contenido de fino,<br>$FC = 0\%$ para diferentes valores de $d/D$ ..... | 17 |
| Ilustración 2.10: Relación entre la densidad relativa y ángulo de fricción según tamaño<br>de arena .....                                      | 18 |
| Ilustración 2.11: Asentamiento inmediato según densidad relativa y saturación del suelo,<br>elaboración propia .....                           | 19 |
| Ilustración 3.1: Esquema de cómo se dejó caer el bloque de concreto, elaboración<br>propia .....   | 20 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 3.1, detalle de ensayos realizados en estudio .....  | 21 |
| Tabla 3.2, estado de arena para realizar ensayo de hundimientos por impacto.....                 | 24 |
| Tabla 4.1, resultado densidad mínima.....  | 26 |
| Tabla 4.2, resultado densidad máxima.....  | 26 |
| Tabla 4.3, resultado densidades relativas .....  | 26 |
| Tabla 4.4, resultado ensayos de hundimiento acumulado para arena seca.....                       | 27 |
| Tabla 4.5, resultado ensayos de hundimiento acumulado para arena con humedad igual<br>a 2% ..... | 28 |

---

|  |    |
|--|----|
| Tabla 4.6, resultado ensayos de hundimiento acumulado para arena con humedad igual a 5% .....                                  | 28 |
| Tabla 4.7, resultado ensayos de hundimiento acumulado para arena con humedad igual a 7% .....                                  | 29 |
| Tabla 4.8, resultado ensayos de hundimiento acumulado para arena con humedad igual a 10% .....                                 | 30 |
| Tabla 4. 9, resultado ensayos de hundimiento acumulado para arena con humedad igual a 15%.....                                 | 30 |
| Tabla 4.10, relación energía/hundimiento para una densidad relativa de 30% .....   | 40 |
| Tabla 4.11, relación energía/hundimiento para una densidad relativa de 50% .....   | 41 |
| Tabla 4.12, relación energía/hundimiento para una densidad relativa de 70% .....   | 41 |
| Tabla 4.13, relación energía/hundimiento para una densidad relativa de 80% .....   | 42 |
| Tabla 4.18, Capacidad de carga de Terzagui.....  | 47 |
| Tabla 4.19, Capacidad de carga de Meyerhof.....  | 47 |
| Tabla 4.20, carga necesaria para que existe el mismo hundimiento en cada primera caída de 50 y 70 cm .....                     | 48 |
| Tabla 4.21, diferencia de hundimiento entre ensayos .....  | 48 |
| Tabla 4.22, variabilidad de hundimiento del suelo para distintas densidades relativas según altura de caída de 50 y 70 cm..... | 51 |
| Tabla 4.23, tensión asociada a la carga gradual Máxima aplicada para replicar el hundimiento para caídas de 50 y 70 cm.....    | 54 |
| Tabla 4.24, Capacidad de carga de Meyerhof y Terzagui para hundimiento en caídas de 50 y 70 cm.....                            | 54 |
| Tabla 4.25, diferencias entre capacidad de carga por hundimiento y superficial entre Meyerhof y Terzagui.....                  | 55 |
| Tabla 4.26, Capacidad de carga última de (Trivedi, 2009) para hundimientos por caídas de 50 y 70 cm                            | 55 |

---

## INDICE DE GRÁFICAS

|   |    |
|---|----|
| Gráfica 4.1, Densidad relativa versus densidad seca.....  | 27 |
| Gráfica 4.2, relación entre el hundimiento y la saturación, para una densidad relativa de 30% .....               | 31 |
| Gráfica 4.3, relación entre el hundimiento y la saturación, para una densidad relativa de 50% .....               | 31 |
| Gráfica 4.4, relación entre el hundimiento y la saturación, para una densidad relativa de 70% .....               | 32 |
| Gráfica 4.5, relación entre el hundimiento y la saturación, para una densidad relativa de 80% .....               | 32 |
| Gráfica 4.6, densidad relativa versus hundimiento, para una caída de 50 cm en arena seca.....                     | 33 |
| Gráfica 4.7, densidad relativa versus hundimiento, para una caída de 70 cm en arena seca.....                     | 34 |
| Gráfica 4.8, densidad relativa versus hundimiento, para una caída de 100 cm en arena seca.....                    | 34 |
| Gráfica 4.9, Relación hundimiento acumulado y N° de caídas para una densidad relativa de 30% .....                | 35 |
| Gráfica 4.10, Relación hundimiento acumulado y N° de caídas para una densidad relativa de 50%.....                | 36 |
| Gráfica 4.11, Relación hundimiento acumulado y N° de caídas para una densidad relativa de 70%.....                | 36 |
| Gráfica 4.12, Relación hundimiento acumulado y N° de caídas para una densidad relativa de 80%.....                | 37 |
| Gráfica 4.13, promedio de diferencia de hundimiento según N° de caídas para diferentes densidades relativas ..... | 38 |
| Gráfica 4.14, promedio de diferencia de hundimiento según N° de caídas separadas por saturación.....              | 39 |

---

|  |    |
|--|----|
| Gráfica 4.15, energía (WH) versus hundimiento, para diferentes tipos de saturación y una densidad relativa de 30% .....  | 43 |
| Gráfica 4.16, energía (WH) versus hundimiento, para diferentes tipos de saturación y una densidad relativa de 50% .....  | 43 |
| Gráfica 4.17, energía (WH) versus hundimiento, para diferentes tipos de saturación y una densidad relativa de 70% .....  | 43 |
| Gráfica 4.18, energía (WH) versus hundimiento, para diferentes tipos de saturación y una densidad relativa de 80%. ..... | 44 |
| Gráfica 4.19, $R_{E/h}$ experimental, para una densidad relativa de 30% .....  | 44 |
| Gráfica 4.20, $R_{E/h}$ experimental, para una densidad relativa de 50% .....  | 45 |
| Gráfica 4.21, $R_{E/h}$ experimental, para una densidad relativa de 70% .....  | 45 |
| Gráfica 4.22 $R_{E/h}$ experimental, para una densidad relativa de 80% .....   | 46 |
| Gráfica 4.23, Diferencia de hundimiento versus saturación en la arena.....   | 49 |
| Gráfica 4.24, saturación versus hundimiento para arena con una densidad relativa de 20% .....                            | 50 |
| Gráfica 4.25, saturación versus hundimiento para arena con una densidad relativa de 30% .....                            | 50 |
| Gráfica 4.26, saturación versus hundimiento para arena con una densidad relativa de 40% .....                            | 50 |
| Gráfica 4.27, relación entre hundimiento y densidad relativa para una caída de 50 cm                                     | 52 |
| Gráfica 4.28, relación entre hundimiento y densidad relativa para una caída de 70 cm                                     | 52 |
| Gráfica 4.29, saturación versus hundimiento para una caída de 50 cm .....  | 53 |
| Gráfica 4.30, saturación versus hundimiento para una caída de 70 cm .....  | 53 |
| Gráfica 4.31, hundimiento versus capacidad de carga a una densidad relativa de 20% y una altura de caída de 50 cm .....  | 56 |
| Gráfica 4.32, hundimiento versus capacidad de carga a una densidad relativa de 30% y una altura de caída de 50 cm .....  | 56 |
| Gráfica 4.33, hundimiento versus capacidad de carga a una densidad relativa de 40% y una altura de caída de 50 cm .....  | 57 |
| Gráfica 4.34, hundimiento versus capacidad de carga a una densidad relativa de 20% y una altura de caída de 70 cm .....  | 57 |

---

|   |    |
|---|----|
| Gráfica 4.35, hundimiento versus capacidad de carga a una densidad relativa de 30% y una altura de caída de 70 cm .....   | 58 |
| Gráfica 4.36, hundimiento versus capacidad de carga a una densidad relativa de 40% y una altura de caída de 70 cm .....   | 58 |
| Gráfica 4.37, Respuesta de hundimiento relacionada a la densidad relativa y separado por rango de saturación para altura de caída de 50 cm .....                      | 60 |
| Gráfica 4.38, Respuesta de hundimiento relacionada a la densidad relativa y separado por rango de saturación para altura de caída de 70 cm .....                      | 60 |
| Gráfica 4.39, Ábaco donde se relaciona el hundimiento con la capacidad de carga última que se genera y como se relaciona la densidad relativa.....                    | 62 |
| Gráfica 4.40, Ábaco para segunda caída donde se relaciona el hundimiento con la capacidad de carga última que se genera y como se relaciona la densidad relativa .... | 62 |

## **INDICE DE ANEXOS**

|   |    |
|---|----|
| Anexo 1, modificación de las ecuaciones de capacidad de carga por nivel de aguas freáticas..... | 67 |
| Anexo 2, tablas con factores de capacidad de carga de Terzagui y Meyerhof.....                  | 67 |
| Anexo 3, Tamaño distribución arenas .....   | 68 |
| Anexo 4, instrumentos utilizados en los ensayos .....   | 69 |
| Anexo 5, Procedimiento para medir el volumen del molde.....                                     | 69 |
| Anexo 6, Procedimiento de tamizado arena .....  | 70 |
| Anexo 7, granulometría de la arena .....  | 70 |
| Anexo 8, arena separada por tamaño .....  | 71 |
| Anexo 9, secado de arena selecciona (tamaño 2mm).....   | 71 |
| Anexo 10, Procedimiento densidad mínima .....   | 72 |
| Anexo 11, procedimiento densidad máxima.....  | 72 |
| Anexo 12, ensayo de hundimiento .....   | 73 |
| Anexo 13, ensayo de hundimiento con humedad de 5%.....  | 73 |
| Anexo 14, muestras recolectadas para densidad mínima .....                                      | 74 |
| Anexo 15, muestras recolectadas para densidad máxima .....                                      | 74 |

---

|  |    |
|--|----|
| Anexo 16, hundimiento versus densidad relativa para caída de 50 cm a diferentes humedades de arena.....  | 75 |
| Anexo 17, hundimiento versus densidad relativa para caída de 70 cm a diferentes humedades de arena.....  | 78 |
| Anexo 18, hundimiento versus densidad relativa para caída de 100 cm a diferentes humedades de arena.....   | 81 |
| Anexo 19, diferencia entre caídas para diferentes humedades de arena.....  | 84 |
| Anexo 20, gráfica diferencia de hundimientos para caída de 50, 70 y 100 cm para densidad relativa de 30, 50, 70 y 80%.....                       | 86 |
| Anexo 21, Relación entre N° de caídas y saturación, separadas por altura de caída y rango de densidad relativa .....                             | 88 |
| Anexo 22, Espectro de caídas con variación de hundimiento versus su N° de caídas, para diferentes alturas de caídas y densidades relativas ..... | 92 |