



UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL DE MINAS

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA
DETERMINACIÓN DE CAPACIDAD DE SOPORTE EN PLAYAS
FORMADAS POR RELAVES CONVENCIONALES,
RESULTADOS PRELIMINARES**

“MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERIA CIVIL DE MINAS”

CAMILA FERNANDA BRAVO DÍAZ

PROFESOR GUÍA

M.Sc. Mauricio Jara Ortiz

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

M.Sc. Carlos Moraga Cruz

M.Sc. Francisco Rivas Saldaña

CURICÓ-CHILE

2020

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



UNIVERSIDAD DE TALCA
DIRECCIÓN
SISTEMA DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD DE TALCA
SISTEMA DE BIBLIOTECAS
CAMPUS CURICO

Curicó, 2022

RESUMEN

A partir de las observaciones que arroje el estudio, se propondrá una metodología práctica que mida la capacidad de soporte in situ en arenas sueltas que se encuentren parcialmente saturadas, con el desarrollo del método, se evaluará si se puede transitar de manera segura sobre una playa de relave convencional.

En la presente memoria, se busca desarrollar una metodología que permita interpretar la capacidad de soporte en playas de relaves convencionales, a través de pruebas realizadas en un entorno controlado, las cuales consistieron en dejar caer un bloque de concreto con un determinado peso a distintas alturas (50, 70 y 100 cm) sobre el nivel del molde, que contenía la arena a ensayar, utilizando diferentes densidades relativas y saturaciones; al aplicar estas dos últimas variables al experimento, se busca reflejar las diversas condiciones que existen en una playa de relave.

Al emplear arenas sueltas con poca presencia de finos, los cálculos realizados en base a las metodologías de Terzagui y Meyerhof no fueron representativos, ya que no se acercan al valor de capacidad de soporte última; en este caso, a partir de las teorías clásicas se pudo determinar la carga del suelo ocasionada por impacto. Por otro lado, usando los datos de tensión gradual máxima y el estudio de Trivedi se obtuvo la tensión última de la arena.

Finalmente, con el análisis realizado, se elaboró un ábaco preliminar, que relaciona la saturación y densidad relativa de la arena, el hundimiento que se genera al dejar caer bloque de concreto y cuál es la respuesta del suelo al ser impactado por el bloque. El ábaco propuesto tiene ciertas limitantes, ya que solo se puede usar bajo las mismas condiciones de caída de bloque que se indica en él.

PALABRAS CLAVES: Relaves, Capacidad de soporte, Comportamiento de la arena, Saturación, Densidades Relativas.

ABSTRACT

Based on the study's observations, a practical methodology will be proposed to measure in situ support capacity in loose sands that are partially saturated. With the development of the method, it will be evaluated whether it is possible to safely walk on a conventional tailings beach.

In this report, we seek to develop a methodology to interpret the support capacity in conventional tailings beaches, through tests carried out in a controlled environment, which consisted in dropping a concrete block with a certain weight at different heights (50, 70 and 100 cm) over the level of the mold that contained the sand to be tested, this will have different relative densities and saturations; by applying these last two variables to the experiment, we seek to reflect the various conditions that exist in a tailings beach.

When using loose sands with little presence of fines, the calculations made based on the methodologies of Terzagui and Meyerhof were not representative, since they do not approach the value of ultimate bearing capacity; the classical theories serve in this case, to know the load of the soil caused by impact. On the other hand, using the maximum gradual stress data and Trivedi's study, it was possible to obtain the ultimate stress of the sand.

Finally, with the analysis carried out in the study, an preliminary abacus was elaborated, which relates the saturation and relative density of the sand, the sinking that is generated when a concrete block is dropped in it and which is the response of the soil when it is impacted by the block. The proposed abacus has certain limitations, since it can only be used under the same conditions of falling block as indicated in it.

KEY WORDS: Tailings, Bearing Capacity, Sand Behavior, Saturation, Relative Densities

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mi mamá, por ser un pilar fundamental en mi vida y darme todas las herramientas necesarias para formar mi futuro. Gracias por enseñarme que, con perseverancia, responsabilidad y pasión por lo que una hace, se puede llegar hasta la meta más lejana. Sin tu amor y paciencia nada de esto sería posible.

A mi hermana Nicole, por su ayuda, apoyo y orientación durante la universidad. Sin ti no hubiera sido lo mismo, gracias por siempre darme tu mano cuando lo necesité.

A mi hermana Toty, aunque no estés presente en esta vida, siempre te siento cuando lo necesito, gracias por ser mi ángel.

A mi hermano Nano, por siempre darme su apoyo y estar pendiente de mi a pesar de estar lejos la mayor parte del año. Gracias por estar presente a pesar de la distancia.

A mi tío Marco y tía Coka, a mi prima Paula y pipe, por darme siempre amor, alegrías y buenos momentos cada vez que nos vemos, son como unos padres y hermana/o para mí.

A mi amiga Paz, por siempre sacarme risas y crear muy buenas anécdotas juntas. Gracias por estar pendiente de mi durante este proceso y en cada momento que te necesite.

A mi Marito, por darme su apoyo incondicional y palabras de aliento durante este proceso, gracias por los momentos llenos de amor y alegrías.

Gracias a los profesores/ras que estuvieron conmigo a lo largo de la universidad y me enseñaron a partir de sus conocimientos y sabiduría. Mención especial a mi profesor guía Mauricio Jara, ya que sin el este estudio no hubiera sido posible, gracias por su paciencia, entrega y disposición a enseñar.

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 (ϕ).....	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 compacidad relativa y la relación D_f/B^*	15
Ilustración 2.8: variación de la capacidad de soporte con distintas cantidades de finos para los diferentes valores de d/D	16
Ilustración 2.9: Variación de la capacidad de soporte, S/D (%) según contenido de fino, $FC = 0\%$ para diferentes valores de d/D	17
Ilustración 2.10: Relación entre la densidad relativa y ángulo de fricción según tamaño de arena	18
Ilustración 2.11: Asentamiento inmediato según densidad relativa y saturación del suelo, elaboración propia	19
Ilustración 3.1: Esquema de cómo se dejó caer el bloque de concreto, elaboración 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 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

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Definición del problema

El proceso minero comprende un conjunto de labores de las cuales se destaca la depositación de relaves, estos corresponden a una mezcla de mineral molido con agua y otros compuestos, que queda como resultado de haber extraído los minerales sulfurados en el proceso de flotación. Este residuo, es transportado mediante canaletas o spigots hasta lugares especialmente habilitados, el lugar de descarga de desechos se denomina playa activa, donde usualmente se seca la superficie y se visualiza una playa de arenas finas; en este punto se produce una sedimentación de las partículas finas provocada por la inclinación del tranque y el agua proveniente de este proceso es recuperada o evaporada para quedar dispuesto finalmente como un depósito estratificado de materiales finos (arenas y limos).

Un relave minero está en continuo crecimiento y tiene una vida útil igual o mayor al yacimiento minero, por lo cual está en constantes revisiones para asegurar su estabilidad y buen funcionamiento. Un sector de evaluación son las playas de relave, ya que en ocasiones se deben realizar tareas como, la reubicación de tuberías de descarga que traen los desechos, revisión de alguna anomalía en la playa o verificación de calidad a la Geomembrana que cubre el muro de contención del tranque y permite que no se filtren los desechos tóxicos, cabe destacar que caminar sobre relaves no es algo común debido al riesgo asociado de esta práctica.

Saber cómo se comportará una playa compuesta por relaves parcialmente saturados al tránsito peatonal, es de gran importancia para prevenir accidentes no deseados en las faenas de operación antes descritas. Debido a lo anterior, en este estudio se desarrollará una metodología para interpretar la capacidad de soporte última que existe en playas de relave convencionales mediante el análisis de su respuesta por asentamiento por impacto.

Finalmente, para interpretar la capacidad de soporte, se realizarán pruebas sobre arenas finas en un entorno controlado, a fin de caracterizar la respuesta por hundimiento para

distintos niveles de acomodo de partículas y grados de saturación, evaluándose como afecta la presencia de agua al hundimiento por carga de impacto.

A partir de lo mencionado, para este proyecto se proponen los siguientes objetivos:

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología práctica que estime la capacidad de soporte in situ de arenas sueltas parcialmente saturada.

1.2.2 Objetivo Específico

- Desarrollar una metodología analítica para determinar la capacidad de soporte en arenas sueltas parcialmente saturada.
- Determinar respuesta al hundimiento en arenas sueltas parcialmente saturada en condiciones controladas.
- Encontrar relación entre el hundimiento registrado con la capacidad de soporte desarrollada por el material.
- Comparar resultados obtenidos y evaluar la metodología para la determinación de capacidad de soporte en arenas sueltas parcialmente saturada.

1.3 Alcances

El alcance de esta memoria es realizar una metodología práctica que estime la capacidad de soporte in situ en arenas sueltas parcialmente saturadas, a través del análisis de datos recopilados en ensayos realizados en un ambiente controlado, los cuales consistirán en lanzar un bloque de concreto a alturas de 50, 70 y 100 cm, desde una cubeta que contiene la arena a ensayar. Esta arena se encontrará a diferentes densidades relativas y saturaciones, las cuales buscan representar los escenarios existentes en una playa de relave. También se realizarán ensayos de tensión, en donde se busca encontrar cuanto será la carga en kilos necesaria para replicar el mismo hundimiento del bloque de concreto en la arena, bajo diferentes condiciones de densidad relativa y saturación.

En base a lo anterior, se realizará un análisis de los datos recopilados y se hará una metodología que mida de manera in situ la capacidad de soporte última que exista en una arena suelta que este parcialmente saturada.

La planificación de esta investigación presupuestaba realizar las pruebas experimentales en el laboratorio de la universidad, pero debido a la contingencia mundial, se depuso el ingreso a está para evitar contagios y mantener la seguridad, al igual que la salud tanto de docentes como de alumnos. Debido a lo anterior los ensayos se realizaron bajo un ambiente controlado en una localidad diferente. Siguiendo el mismo protocolo establecido por la Norma Chilena de determinación de densidades máximas y mínimas NCh 1726 de 1980.

2. MARCO TEÓRICO

En las faenas mineras se desecha gran cantidad de residuos, como son los provenientes de las plantas de concentración de minerales por flotación. Estos desechos se denominan relaves, según el Sernageomin corresponde al material finamente molido que pasa por un proceso de flotación, pero que no cumple con los requisitos para ser vendido ya que tiene muy baja concentración de cobre, este resto es desechado y depositado de manera segura en un lugar establecido.

Según gráficos de la Comisión Chilena del Cobre (2020), a medida que pasan los años se ha visto un aumento considerable en la demanda de productos provenientes de la minería, pero por otra parte las leyes de los yacimientos han ido en decadencia, lo que obliga a las empresas mineras a sacar mucho más material de lo usual para así mantener sus niveles de producción óptimos. Todo lo esto conlleva a que se extraiga mucho más material estéril y pulpas de relaves que años anteriores, estos productos son derivados a los depósitos de relaves.

2.1 Relave

Según los autores Araya, V., Suazo, G., Villavicencio G., & Silva M. (2019) los tranque de relave se definen como *“estructuras únicas, que están en continuo crecimiento y cuya operación tiene un impacto directo en el proceso de extracción de minerales, por tanto, en el negocio minero”* (pp. 35-41). Tal como se muestra en la Ilustración 2.1, un tranque de relave se constituye por un muro de contención y una cubeta, en esta se depositan los desechos del relave a través de tuberías, los cuales forman posteriormente una laguna y una playa activa. En esta última ocurre la descarga de los relaves en la cubeta, este se seca en la superficie y queda arena, junto con esto, ocurre el fenómeno de segregación de partículas debido a la pendiente y la fuerza de gravedad, lo que hace que las arenas queden cerca del muro y el limo en el sector de la laguna. El presente estudio se enfocará en la capacidad de soporte que podría desarrollar el material presenta en la playa activa del relave ya que es ahí donde ocurren actividades de operación que implican el tránsito de personas, ya sea para realizar estudios o para hacer revisiones de alguna anomalía en la depositación de desechos.

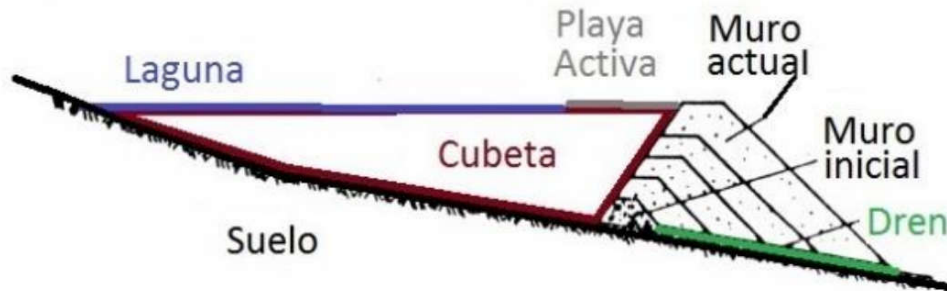


Ilustración 2.1: Modelo tranque de relaves
Fuente: (Sernageomin, 2020)

Los relaves se depositan en ciertos sectores y tiempos determinados, para así ir formando playas extensas y lograr que la laguna que se genera por el agua de la pulpa quede lo más alejada posible del muro de contención del relave.

Para que el relave vaya creciendo gradualmente y sea estable, se deben considerar ciertas características, como lo son la granulometría, densidad relativa, densidades máxima y mínima, razón de vacíos, acomodo de las partículas, entre otros. Es fundamental, además, controlar cómo será la depositación del relave, ya que eventualmente se pueden realizar trabajos sobre este, ya sea para controlar la posición de spigots, realizar impermeabilizaciones vía colocación de geomembranas sobre la playa de relave, instalación de piezómetros, realizar algún tratamiento al talud aguas arriba o simplemente revisar alguna anomalía que exista en la depositación. Los tipos de descarga de relaves son un factor muy importante de las playas del depósito, a continuación, en la Ilustración 2.2, se muestran dos tipologías, el tipo (a) es por grifos o spigots y el tipo (b) es por descarga en un solo punto. La diferencia entre cada uno es que en la primera son múltiples grifos lo que descargan el relave lo cual hace que se distribuya uniformemente los desechos. En cambio, el segundo método, es solo un lugar de descarga, el cual se va moviendo a través de segmentos de tuberías, según como se quiera ir acomodando el relave.

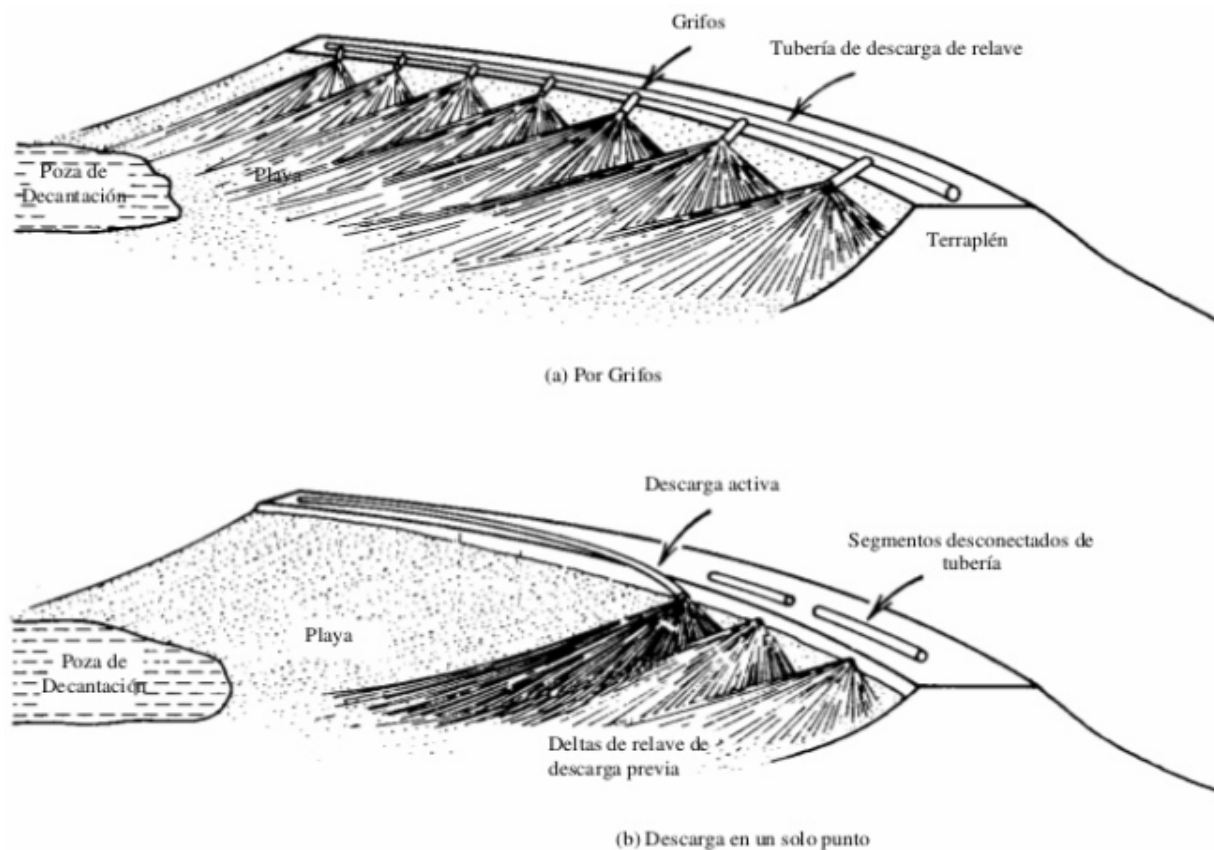


Ilustración 2.2: Tipos de descarga de relave
Fuente: (Vick, 1983)

2.1.1 Consideraciones de seguridad para trabajar sobre un tranque de relave

Para actividades de tránsito sobre playas activas, es fundamental mantener condiciones óptimas del tranque de relave, tal como se ve en la Ilustración 2.3, donde se está realizando una instalación y mantención a una geomembrana para esta. Algunas consideraciones dadas la guía técnica de operación y control de depósitos de relaves del (Sernageomin, 2007) son:

- Realizar controles de rutina para la detección temprana de posibles asentamientos o deformaciones, posibles grietas, filtraciones anormales, etc.
- Se debe formar una playa de arenas lo más extensa posible, para así mantener la laguna de aguas claras lo más alejada del muro.
- Verificar el grado de compactación del muro de arenas, a través de controles de densidad in-situ.

Uno de los peores escenarios que podría ocurrir en un tranque de relave es la licuefacción, el cual consiste en una pérdida total de la resistencia al corte de un suelo saturado por incremento de la presión de poros. El caso más frecuente de licuefacción ocurre por acción sísmica sobre materiales areno-limosos saturados. Los relaves saturados son altamente susceptibles a licuefacción sísmica, en especial, si la permeabilidad y densidad son bajas. Es el fenómeno más preocupante que ocurra en un tranque de relave (Sernageomin, 2007).

Cabe destacar que para la construcción y operación de cualquier tipo de tranque de relave el organismo regulador es el Sernageomin, el cual se rige por las normas contenidos en el Decreto N°86/70, donde se regulan la forma de diseño, construcción y operación de estos.



Ilustración 2.3: instalación y mantenimiento de geomembrana en depósito de relave
Fuente: (McKenna, 2014)

2.2 Opciones para la descarga de los relaves

Según la guía técnica de operación y control de depósitos de relaves mostrada por el Sernageomin, al momento de comenzar la descarga de los relaves se deben considerar varios factores ya que todo lo que se deposite se debe almacenar hasta que la planta cumpla con su vida útil. En la actualidad existen decretos y normas que regulan la construcción de los relaves y de esta manera cumplir con todos los parámetros de seguridad.

Para definir las opciones de depositación de un material de relaves, dependerá finalmente de las características de los relaves que se producen en la planta, del costo del agua y de las características del lugar donde se pondrá el depósito de relaves.

Toda planta minera que tenga un proceso de flotación producirá residuos que se denominan relaves y como se nombre anteriormente, corresponde a una suspensión fina de sólidos en líquido, lo cual conforma una pulpa o lodo de relaves tiene una razón aproximada de sólido/agua de 1:1 a 2:1, tal como se muestra en la Ilustración 2.4.



Ilustración 2.4: Depositación de relave
FUENTE: (*Minería Chilena, 2015*)

El comportamiento que tenga esta pulpa depende de la razón sólido/agua y también de las características de las partículas sólidas. Algunas consideraciones al respecto:

- Un relave con gran contenido de agua escurrirá más fácil, incluso si la pendiente es pequeña.

-
- Si las partículas sólidas son grandes, equivalentes a arenas, sedimentarán de manera rápida y se acumularán a una corta distancia a partir del punto de descarga.
 - Si las partículas son de tamaño pequeño, equivalentes a arcillas, se demorarán en tiempo considerable en sedimentar, manteniéndose así en suspensión y alcanzarán gran distancia con respecto al punto de partida de las descargas antes de finalmente sedimentar.
 - Un relave con poco contenido de agua, por ejemplo, relaves filtrados, no escurrirá por gravedad.

Se considera que un relave es una mezcla de sólido y agua, que al ser embalsado forma una playa de relave cerca del muro de contención y una laguna más alejada de esta, esto ocurre debido a la segregación de partículas y la fuerza de gravedad, lo cual genera que se separe la arena del limo, dejando la arena en la playa y el limo en el sector de la laguna.

2.3 Estado de acomodo de las partículas en playa de relave

El estado de acomodo de las partículas en playas de relave convencionales depende de factores, como, la forma en que se distribuye el relave en el depósito, la distribución granulométrica del material, la segregación natural de partículas debido a la pendiente que tiene el tranque y la fuerza de gravedad que actúa en este. Generalmente, las arenas más finas quedan en la playa, mientras que las partículas más grandes se dirigen hacia la laguna. El grado de acomodo o compacidad del material se verá a través de la densidad relativa, se puede evaluar en suelos en estado naturales o para suelos compactados artificialmente. Para este estudio, se verán suelos compactados artificialmente.

2.3.1 Densidad relativa

La densidad relativa es un estado de compacidad de un suelo con respecto a los estados más sueltos y densos obtenidos mediante los procedimientos de laboratorio (NCh1726, 1980) indica el grado de compactación de un material, se usa para suelos naturales y para suelos con relleno compactado. Esta densidad es una propiedad índice del estado de los suelos, se usa normalmente en gravas y arenas.

Según la norma chilena, el porcentaje de finos no debe sobrepasar un 12% para que la densidad relativa sea aplicable, ya que para la determinación de la densidad máxima se debe utilizar una mesa vibratoria y este procedimiento no es efectivo si existe una mayor cantidad de finos. Se define la densidad máxima como la densidad de un suelo en el estado más denso obtenible según un ensayo normal y la densidad mínima como la densidad de un suelo en el estado más suelto obtenible según un ensayo normal.

Para el caso de estudio, se utilizarán arenas tamizadas que pasaran por la apertura de 2,0 mm; se utilizó esta arena porque cumple con los estándares para realizar el cálculo de densidad máxima y mínima nombrados anteriormente.

Para el cálculo de la densidad seca mínima en g/cm^3 se usa la siguiente fórmula para aproximadamente $0,01 \text{ g/cm}^3$.

$$\rho_{min} = \frac{m_s}{V} \quad (1)$$

Donde ρ_{min} = densidad seca mínima, g/cm^3

m_s = masa seca del suelo que llena el molde, g

V = capacidad volumétrica del molde, cm^3

Para el cálculo de la densidad seca máxima en g/cm^3 se usa la siguiente fórmula para aproximadamente $0,01 \text{ g/cm}^3$.

$$\rho_{max} = \frac{m_s}{V_c} \quad (2)$$

Donde ρ_{max} = densidad seca máxima, g/cm^3

m_s = masa seca del suelo que llena el molde, g

V_c = volumen del suelo compactado, es aproximadamente 1 cm^3

Para el cálculo de V_c , se debe considerar la siguiente ecuación.

$$V_c = V - \frac{L_i - L_f}{10} A \quad (3)$$

Donde L_i = lectura inicial del calibre, mm

L_f = lectura final del calibre, mm

A = área seccionada del molde en cm^2

Cabe destacar que los valores de las densidades descritas se pueden obtener en pruebas de laboratorios.

Terzaghi define la densidad relativa D_r como una ecuación fraccionaria de las relaciones de vacíos de los suelos en su estado más suelto (e_{max}), en un estado natural (e) y en un estado de máxima densidad posible (e_{min})

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (4)$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (5)$$

Donde: e = Estado natural del suelo.

V_v = Volumen de vacíos del suelo.

V_s = Volumen de sólidos del suelo.

En algunos casos se utiliza el peso unitario del suelo para calcular la densidad relativa, ya que el cálculo de la relación de vacíos necesita de la gravedad específica del suelo, la cual en ocasiones puede no conocerse. Entonces, para el cálculo de la densidad relativa utilizando los pesos unitarios, se utiliza la siguiente expresión:

$$D_r = \frac{\gamma_f - \gamma_1}{\gamma_2 - \gamma_1} \times \frac{\gamma_2}{\gamma_f} \quad (6)$$

Donde γ_f = Densidad del suelo en su estado natural (valor in situ) (g/cm^3)

γ_1 = Peso unitario del estado de densidad mas suelto obtenido en el laboratorio (g/cm^3)

γ_2 = Peso unitario en el máximo estado de densidad obtenido en el laboratorio (g/cm^3)

Estas expresiones son utilizadas también en la guía técnica de operación y control de depósitos de relaves, confeccionada por el Sernageomin en el año 2007. La densidad

relativa se puede clasificar según los estándares de la Ilustración 2.5; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Compacidad de un suelo granula (D_r)	
Compacidad relativa (D_r en %)	Descripción
0-20	Muy suelto
20-40	Suelto
40-60	Medio
60-80	Denso
80-100	Muy denso

Ilustración 2.5: Descripción del suelo según la densidad relativa
 FUENTE: (Lambe & Whitman, 2004)

2.4 Capacidad de soporte de un suelo

La capacidad de carga en suelos corresponde a la carga por unidad de área bajo la cual ocurre la falla por corte en el suelo (Braja M. Das, 1999). Según la Ilustración 2.6, q corresponde a la variación de carga por unidad de área; al momento en que q sea igual a la carga última de la cimentación (q_u), se dará lugar a una falla repentina en el suelo y la zona de falla del suelo se extenderá hasta la superficie del terreno.

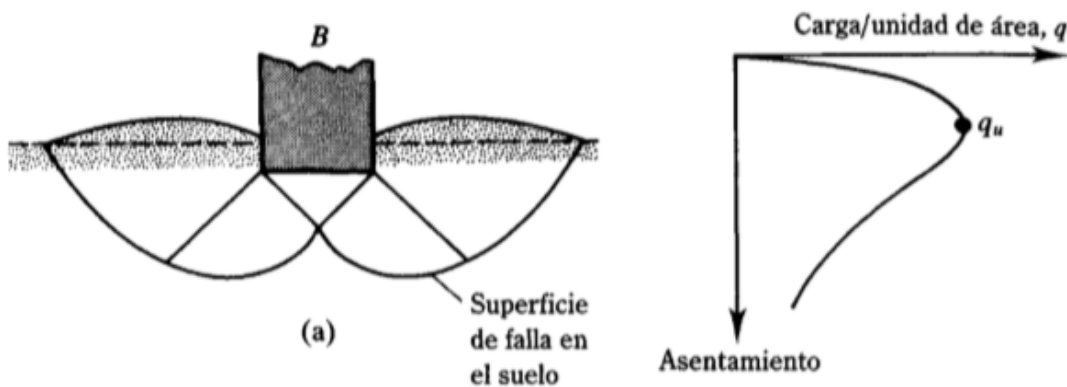


Ilustración 2.6: Naturaleza de falla en un suelo por capacidad de carga
 FUENTE: (Braja M. Das, *Cimentaciones superficiales: Capacidad de carga última*, 1999)

Para la estimación de capacidad de soporte existen varias metodologías que proponen diversos autores, para este caso de estudio, se consideró las teorías de Terzagui, Meyerhof y Trivedi, que son mencionadas a continuación.

2.4.1 Capacidad de carga de Terzagui

La teoría de la capacidad de carga de Terzagui, la cual evalúa la carga última de cimentaciones superficiales. Esta dice que una cimentación es superficial si la profundidad (D_f) de la cimentación es menor o igual que el ancho de esta y que una cimentación corrida es cuando la relación ancho y longitud de la cimentación tiende a cero.

Terzagui (1943) expresó la capacidad de carga última para la cimentación corrida con la siguiente ecuación:

$$q_u = cN_c s_c + qN_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma s_\gamma \quad (7)$$

Donde: c = cohesión del suelo.

γ = peso específico del suelo (kN/m^3)

$q = \gamma D_f$

B = ancho cimentación

s_c = Para estructuras lisas = 1; redondas = 1.3; cuadradas = 1.3

s_γ = Para estructuras lisas = 1; redondas = 0.6; cuadradas = 0.8

N_c, N_q, N_γ = factores de capacidad de carga adimensionales que están únicamente en función del ángulo de fricción (ϕ) del suelo.

Los factores de carga se definen con las siguientes expresiones:

$$N_c = \cot \phi \left[\frac{e^{2\left(\frac{3\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) \tan \phi}}{2 \cos^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)} - 1 \right] = \cot \phi (N_q - 1) \quad (8)$$

$$N_q = \frac{e^{2\left(\frac{3\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) \tan \phi}}{2 \cos^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)} \quad (9)$$

$$N_\gamma = \frac{1}{2} \left(\frac{K_{p\gamma}}{\cos^2 \phi} - 1 \right) \tan \phi \quad (10)$$

Donde $K_{p\gamma}$ = coeficiente de empuje pasivo.

2.4.2 Capacidad de carga de Meyerhof

La teoría de capacidad de carga de Meyerhof toma en cuenta los esfuerzos cortantes desarrollados en el suelo arriba del nivel de desplante del cimiento. Además, que las

cimentaciones pueden tener una carga inclina. Esta teoría considera varios factores al momento de realizar el cálculo de capacidad de carga, está el factor de forma, factor de profundidad y factor de inclinación, cada uno de estos relacionados con su factor de capacidad de carga, tal como se ve en siguiente ecuación:

$$q_u = cN_c s_c d_c + qN_q s_q d_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma s_\gamma d_\gamma \quad (11)$$

Donde: c = cohesión del suelo.

γ = peso específico del suelo (kN/m³)

$q = \gamma D_f$

B = ancho cimentación

s_c, s_q, s_γ = factores de forma

$$s_c = 1 + 0.2K_p \frac{L}{B}, \forall \phi \quad (12)$$

$$s_q = s_\gamma = 1 + 0.1K_p \frac{L}{B}, \phi > 10^\circ \quad (13)$$

$$s_q = s_\gamma = 1, \phi = 0 \quad (14)$$

d_c, d_q, d_γ = factores de profundidad

$$d_c = 1 + 0.2\sqrt{K_p} \frac{D}{B}, \forall \phi \quad (15)$$

$$d_q = d_\gamma = 1 + 0.1\sqrt{K_p} \frac{D}{B}, \phi > 10^\circ \quad (16)$$

$$d_q = d_\gamma = 1, \phi = 0 \quad (17)$$

$$K_p = \tan^2(45 - \frac{\phi}{2}) \quad (18)$$

N_c, N_q, N_γ = factores de capacidad de carga adimensionales que están únicamente en función del ángulo de fricción (ϕ) del suelo.

Los factores de carga se definen con las siguientes expresiones:

$$N_c = \cot \phi (N_q - 1) \quad (19)$$

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2(45 - \frac{\phi}{2}) \quad (20)$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1.4\phi) \quad (21)$$

En base a las expresiones anteriores, Terzagui y Meyerhof proponen tablas con los valores de factores de carga para cada ángulo de fricción. Ver Anexo 2.

Para la utilización de las expresiones anteriores, es necesario considerar también los mecanismos de fallas que podría desarrollar el suelo (ver Ilustración 2.7; **Error! No se**

encuentra el origen de la referencia.) Dentro de los diferentes tipos de mecanismos de falla es posible reconocer; la falla generalizada, la falla localizada y la falla por punzonamiento. Por lo general, las metodologías señaladas tienen un buen ajuste a la respuesta de suelos densos (falla general de corte) o medianamente densos (falla local). A continuación, se muestra como es la respuesta de la arena al interactuar con una zapata circular y una rectangular, para diferentes condiciones de compacidad relativa y profundidad de cimentación.

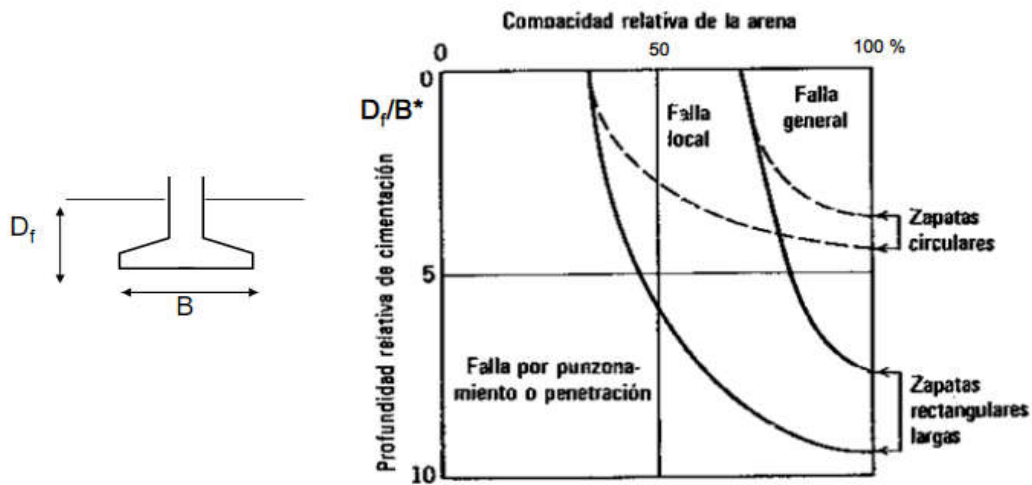


Ilustración 2.7: Gráfico con tipo de falla probable en arena, dependiendo de su compacidad relativa y la relación D_f/B^*

FUENTE: (Vesic, 1973)

$$B^* = \frac{2 \cdot B \cdot L}{B + L} \quad (22)$$

Donde:

B = Ancho de la zapata (m)

L = Largo de la zapata (m)

Por otro lado, cuando un suelo presenta un estado de acomodo bajo ($DR < 50\%$), es un indicador de potenciales fallas por punzonamiento, es necesario analizar la respuesta del suelo vía metodologías experimentales.

2.4.3 Estudio capacidad de carga de Ashutosh Trivedi

(Trivedi, 2009) evaluó la capacidad de carga y asentamiento de zapatas que descansan sobre arenas limosas sueltas confinadas. En dicho estudio se realizaron experimentos de

laboratorio en arenas limpias y arenas limosas sueltas ($DR \approx 50\%$) con contenidos de limos variables hasta un 25%. Los resultados indican que la capacidad de carga disminuye con la adición de finos, tal como se ve en la Ilustración 2.8.

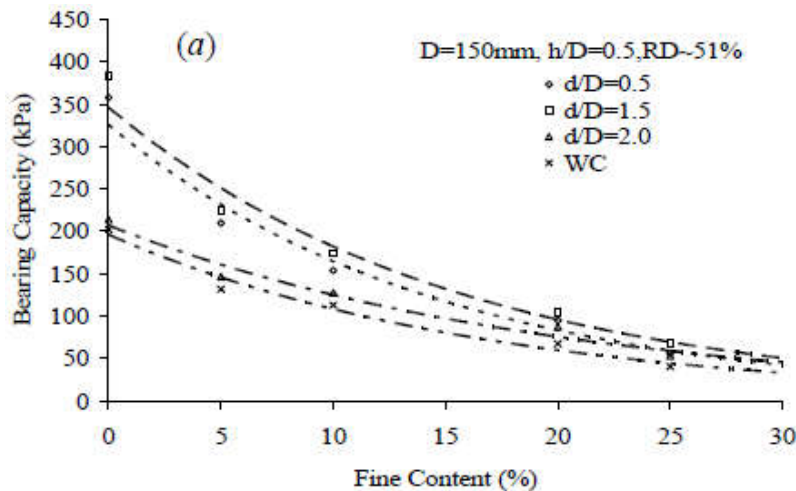


Ilustración 2.8: variación de la capacidad de soporte a distintos contenidos de finos para los diferentes valores de d/D
 FUENTE: (Trivedi, 2009)

También muestran que el asentamiento puede disminuir apreciablemente por confinamiento del suelo. Se interpretó que tal confinamiento proporciona un desplazamiento lateral del suelo debajo de la zapata. En la Ilustración 2.9, se muestra la variación de la capacidad de soporte para diferentes relaciones de d/D , donde d corresponde al diámetro de la celda y D es el diámetro de la zapata. el autor propone que la capacidad última en el suelo se interpreta como la presión de apoyo que se produce (en promedio) para un asentamiento relativo del 10% del diámetro/lado de la zapata (la línea punteada corresponde a $S/D = 0,1$; donde S es el asentamiento de la zapata y D es el diámetro de esta).

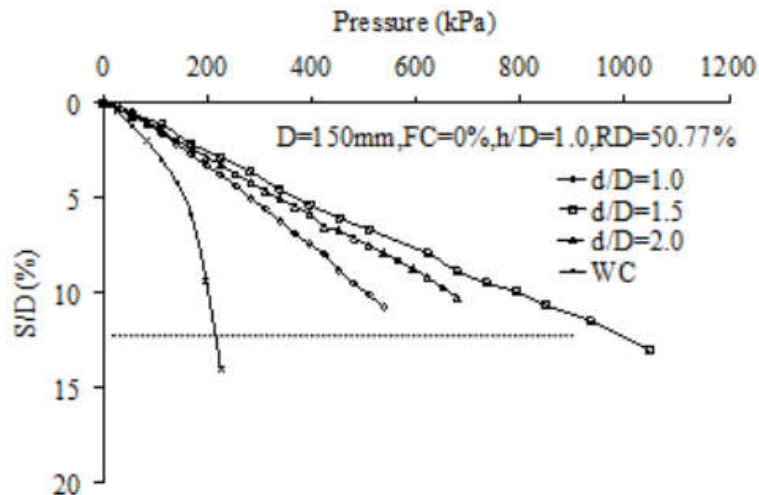


Ilustración 2.9: Variación de la capacidad de soporte, S/D (%) según contenido de fino, FC = 0% para diferentes valores de d/D
FUENTE: (Trivedi, 2009)

2.5 Relación entre la densidad relativa (DR) y el ángulo de fricción de suelo (ϕ)

Es ampliamente conocido que la relación entre densidad relativa y ángulo de fricción de un suelo es directa y creciente. Su definición se deriva del criterio de falla de Mohr-Coulomb y se usa para describir la resistencia al cizallamiento por fricción de los suelos junto con el esfuerzo efectivo normal, en otras palabras, es el ángulo de inclinación con respecto al eje horizontal de la línea de resistencia al corte de Mohr-Coulomb. Para el caso de estudio se utilizará arena, la cual es un material granuloso sin cohesión, en consecuencia, el ángulo de reposo coincide con el ángulo de rozamiento interno. La forma de las partículas tiene efectos limitados en el ángulo de fricción de las arenas en comparación con la distribución del tamaño del grano, ya que, al tener partículas de gran tamaño en una mezcla de arena, esta provoca variación en la dilatación y fricción en el esfuerzo inducido, lo cual puede ser interpretado como una baja densidad relativa (D_r). En otras palabras, al existir partículas de gran tamaño provoca un aumento en el ángulo de fricción interno de arenas uniformes, ya que, se ve afectado la porosidad del material, ocasionando que este aumenta y el ángulo de fricción disminuya.

La relación con la densidad relativa (D_r) se explica solo en base físicas, por lo que se desarrollaron ecuaciones empíricas para predecir la resistencia a la deformación. Un

ejemplo de relación se ve en la Ilustración 2.10, la cual fue realizada por los autores (Sezer, Altun, & Göktepe, 2011), ellos realizaron un estudio sobre la relación entre el tamaño de las arenas y su resistencia al corte, en donde se muestra variación del ángulo de fricción (ϕ) de arenas derivadas del tamaño de las partículas para ciertos valores de densidad relativa (D_r); el rango de tamaños para arenas finas, medias y gruesas se puede ver en el Anexo 3. Se observa que, siguiendo la línea de tendencia de los diferentes tipos de tamaños de arenas junto con sus ángulos de fricción, se puede destacar un área, donde se muestra cual es el rango de variación, para arenas finas (puntos amarillos), medias (puntos azules) o gruesas (puntos verdes), con unas densidades relativas que van desde el 20 al 90%. Según los autores, el ángulo de fricción interna aumenta cuando la relación de vacíos (e) disminuye y la densidad relativa (D_r) aumenta.

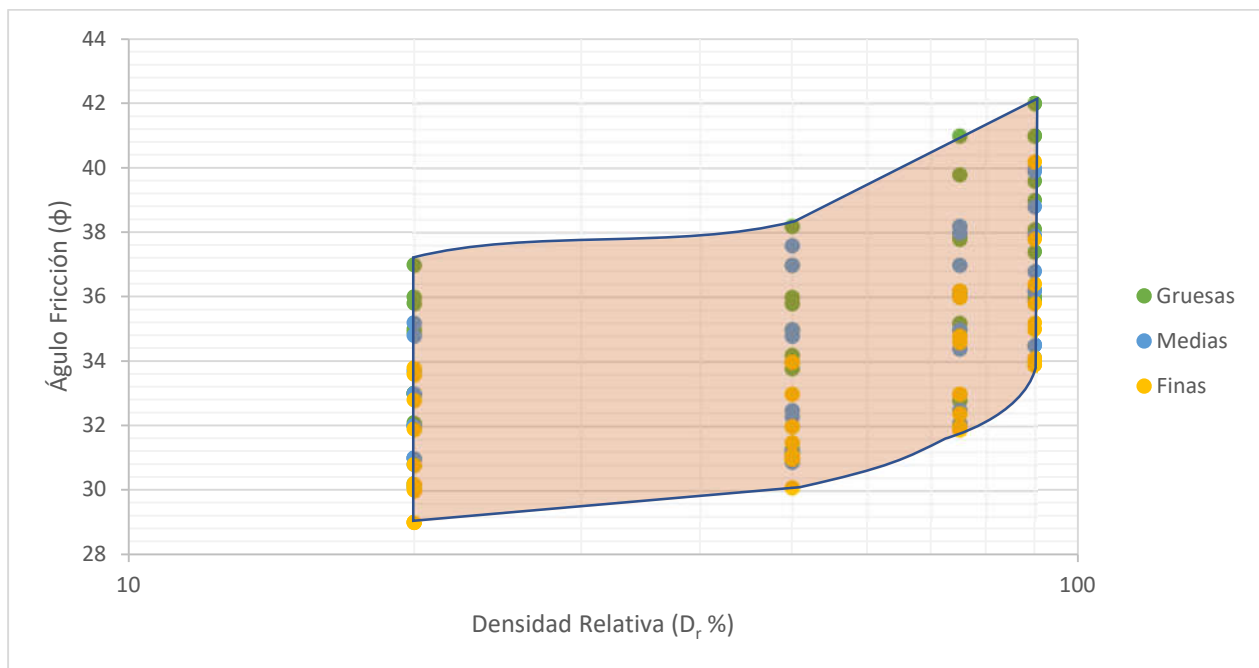


Ilustración 2.10: Relación entre la densidad relativa y ángulo de fricción según tamaño de arena
FUENTE: (Sezer, Altun, & Göktepe, 2011)

2.6 Comportamiento energético de un suelo

2.6.1 Asentamiento en suelo

El asentamiento del suelo será un factor importante por estudiar y analizar, se debe tener la mayor claridad posible acerca de su comportamiento, antes de permitir el tránsito sobre

este. Existen tres tipos de asentamientos en suelos, en donde está el inmediato, por consolidación primaria y por consolidación secundaria, debido a la naturaleza del suelo utilizado en este estudio, se considerará solo el de asentamiento inmediato (de rápido drenaje).

2.6.1.1 Asentamiento Inmediato

El asentamiento inmediato es provocado por la deformación elástica, donde sucede un cambio de volumen, esta compresión del suelo ocurre inmediatamente después de aplicar la carga, lo cual producirá una deformación horizontal en el suelo. Para el cálculo de asentamiento se usan ecuaciones derivadas de la teoría de la elasticidad.

Para el caso de estudio, se dejará caer un bloque de concreto sobre una superficie lisa de arena (con distintas densidades relativas y grados de saturación) y se evaluará la deformación inmediata generada, la Ilustración 2.11, muestra la simplicidad del proceso considerando una masa desde una altura (H), y hundimiento (h), D_r es la densidad relativa y S_r es la saturación del suelo. Teóricamente, se puede decir que, a una mayor saturación y una baja densidad relativa, h será mayor, ya que existe mayor penetración en el suelo. En el caso contrario, al tener un suelo poco saturado y con una alta densidad relativa, h va a ser menor porque el suelo está más firme y compacto que en el caso anterior.

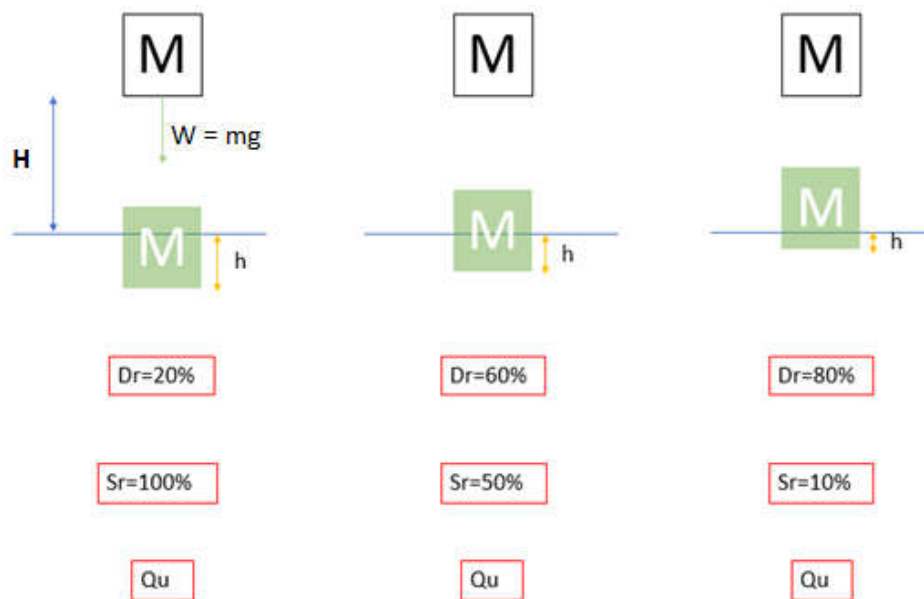


Ilustración 2.11: Asentamiento inmediato según densidad relativa y saturación del suelo, elaboración propia

3. METODOLOGÍA

Dado que el objetivo general del estudio es desarrollar una metodología práctica que estime la capacidad de soporte in situ de arenas de relaves, se desarrolló una metodología experimental en base a la normativa chilena 1726 de 1980 para cumplir con las necesidades del estudio. Los ensayos se llevaron a cabo en una instalación fuera de la universidad, bajo condiciones controladas.

Debido a que se busca verificar los objetivos trazados, el presente estudio es elaborado bajo un enfoque cuantitativo, el cual consiste en recolectar y analizar datos obtenidos en pruebas bajo condiciones controladas; estas consisten en dejar caer un bloque de concreto a distintas alturas en diferentes densidades relativas de suelo y también a distintos grados de saturación, los cuales reflejaban las diversas condiciones que existen en una playa de relave.

El tamaño y desglose de la muestra que se utilizó en la primera parte del estudio se puede ver en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, la cual consistió en realizar ensayos de densidad máxima y mínima para encontrar finalmente la densidad relativa de la arena que se usaría en los ensayos de hundimiento. Este último consistió en dejar caer un bloque de concreto a alturas de 50, 70 y 100 sobre una superficie de arena (con distintas densidades relativas y grados de saturación, ver Ilustración 3.1)



Ilustración 3.1: Esquema de cómo se dejó caer el bloque de concreto, elaboración propia

Tabla 3.1, detalle de ensayos realizados en estudio

Tipo de ensayo	N° Pruebas
Densidad Mínima	8
Densidad Máxima	8
Hundimiento / H = 50 / Sr 0%	20
Hundimiento / H = 50 / Sr 7-10%	20
Hundimiento / H = 50 / Sr 17-24%	20
Hundimiento / H = 50 / Sr 25-34%	20
Hundimiento / H = 50 / Sr 35-50%	20
Hundimiento / H = 50 / Sr 51-75%	20
Hundimiento / H = 70 / Sr 0%	20
Hundimiento / H = 70 / Sr 7-10%	20
Hundimiento / H = 70 / Sr 17-24%	20
Hundimiento / H = 70 / Sr 25-34%	20
Hundimiento / H = 70 / Sr 35-50%	20
Hundimiento / H = 70 / Sr 51-75%	20
Hundimiento / H = 100 / Sr 0%	20
Hundimiento / H = 100 / Sr 7-10%	20
Hundimiento / H = 100 / Sr 17-24%	20
Hundimiento / H = 100 / Sr 25-34%	20
Hundimiento / H = 100 / Sr 35-50%	20
Hundimiento / H = 100 / Sr 51-75%	20
Cantidad de ensayos realizados	396

De los datos recopilados anteriormente, se seleccionaron aquellos que tuvieran información relevante del suelo y que fuese útil para el estudio. Para el análisis de datos se realizaron tablas, gráficos y/o medidas de resumen través de Microsoft Office Excel.

3.1 Materiales

La primera parte de los ensayos, se realizaron pruebas para medir la densidad mínima y máxima de la arena que se usará posteriormente, para esta parte se utilizaron los siguientes instrumentos:

- Molde cilíndrico de plástico, dimensión 13,5 cm de alto por 7,8 cm de ancho. Con una capacidad de 718 cm³.
- Una sobrecarga de 725 g.
- Balanza con precisión de 1 g.
- Set de tamices.
- Taladro marca Bauker modelo ID600E
- Regla metálica de 400 mm, un micrómetro de 0 a 25 mm con una precisión de 0,01 mm.
- Mini pala
- Broca
- Cronometro

Posteriormente, para la segunda parte de los ensayos, se utilizó un bloque de concreto de 15x15x15 cm, con peso de 7,6 kg. Las imágenes de los instrumentos utilizados se pueden ver en el

Anexo 4.

3.2 Ensayo densidades

Para comenzar con estos ensayos, se debe hacer una calibración del molde, este se realizó por el método de llenado con agua, el cual consiste en colocar el molde sobre una superficie firme, plana y horizontal; se llena con agua el molde a temperatura ambiente y se enrasa con una placa de vidrio eliminando burbujas de aire y el exceso de agua. Luego se masa el agua que llena el molde y posteriormente se mide la temperatura del agua y se determina su densidad; con todo lo anterior se puede determinar la capacidad volumétrica del molde (ver Anexo 5).

Luego, se tamizo la arena que se utilizaría para los ensayos (ver Anexo 6) y se realizó una curva granulométrica para identificar el tipo de arena que se usaría en el estudio (ver

Anexo 7); Posteriormente se seleccionó usar solo arenas que pasaran por el tamiz de apertura 2 mm, para luego ser vaciada a un recipiente y ser usada en los ensayos de densidades (ver Anexo 8); el secado de la arena se puede ver en el Anexo 9.

Para el procedimiento de medir la densidad mínima, la cual consiste en colocar el molde en una superficie firme, plana y horizontal para llenar con material de la muestra, vaciándola a distancia de 25 mm y dejando caer la muestra continuamente y de manera suave para que quede lo más suelto posible, hasta que el molde este lleno. Luego se enrasan el molde con una pasada continua con la regla de acero procurando no compactar el material. para pesar el molde con la muestra, evitando cualquier golpe o vibración en este procedimiento; este paso se repitió 8 veces (ver

Anexo 10), finalmente la densidad mínima dio como resultado $1,373 \text{ g/cm}^3$.

Por otro lado, para determinar la densidad máxima, se divide el molde en 5 partes iguales, para ir depositando capa a capa la muestra, cada una de estas es apisonada por medio de golpes (>40 golpes/capa) y luego vibrar (por 8 minutos) con un taladro cada capa depositada, la cual también tiene un peso encima al realizar esta última acción. Se debe registrar el peso de la muestra, altura al ser depositada y posterior al vibrado; este paso se repitió 8 veces (ver Anexo 11), finalmente la densidad máxima dio como resultado $1,866 \text{ g/cm}^3$.

3.3 Hundimiento por impacto

Definida la densidad relativa a utilizar es posible seguir con los ensayos de caída de bloque, estos consisten en: utilizar un recipiente cilíndrico de 34,5 cm de alto y 29 cm de diámetro, en donde se llenó hasta la mitad de su altura con arena a una densidad relativa de 30%. Luego se calculó los kilos de arena según el volumen del recipiente hasta la mitad y despejando la densidad del suelo con la expresión de densidad mínima y máxima antes calculada. Sobre el suelo dejar caer el bloque desde diferentes alturas (50, 70 y 100 cm) y medir con una guincha/regla el hundimiento generado por el bloque en la arena

(el máximo y el mínimo hundimiento que fuese observado). Se debe repetir el proceso anterior para los casos mostrados en la Tabla 3.2; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Tabla 3.2, estado de arena para realizar ensayo de hundimientos por impacto

Estado seco	Humedad al 2%	Humedad al 5%	Humedad al 7%	Humedad al 10%	Humedad al 15%
Dr 30 %	Dr 30 %	Dr 30 %	Dr 30 %	Dr 30 %	Dr 30 %
Dr 50 %	Dr 50 %	Dr 50 %	Dr 50 %	Dr 50 %	Dr 50 %
Dr 70 %	Dr 70 %	Dr 70 %	Dr 70 %	Dr 70 %	Dr 70 %
Dr 80 %	Dr 80 %	Dr 80 %	Dr 80 %	Dr 80 %	Dr 80 %

Para cada caso mostrado en la tabla anterior se debe calcular la cantidad de agua y mezclar con la arena de forma previa antes de colocar la arena en el recipiente, este proceso se puede ver en Anexo 12 y Anexo 13.

3.4 Desarrollo de capacidad de carga lenta experimental

Se busca replicar el hundimiento del bloque de concreto del ensayo anterior, pero ahora se parte de la base que el bloque está en reposo sobre la arena. Se ira agregando carga en kilos y ver cuánto se necesita para que la arena se desplace y genere un hundimiento igual que los ensayos anteriores. Es decir, si antes el bloque al ser lanzado desde una altura de 50 cm y con una arena que tiene una densidad relativa de 30% con una humedad del 2%, se hunde un 4.6 cm. Entonces, se debe buscar cuanto es la carga en kilos necesaria para que el bloque bajo las mismas condiciones de humedad y densidad se desplace lo mismo, es decir se verificará de manera física cuanto es la carga necesaria para que ocurra un desplazamiento igual en la arena y se hunda el bloque.

3.5 Capacidad de carga última

El cálculo de capacidad de carga a través de la metodología de Terzagui y Meyerhof fue descrito de forma teórica anteriormente, para esta operación se requiere saber el peso unitario del suelo (γ), ángulo de fricción (ϕ), capacidad de carga (q) y el ancho del bloque que se utilizó anteriormente.

El ángulo de fricción a utilizar en cada paso corresponderá a la relación entre la densidad relativa y este anteriormente señalado, de esa forma se podrá obtener el valor que se necesita usar para cada cálculo. También en base a la densidad relativa se calcula la densidad del suelo, haciendo una relación con las densidades mínimas y máximas. Por otro lado, se considera una cohesión nula debido a que se trata de arena.

Por otro lado, se correlacionará la capacidad de carga última del suelo con la densidad del suelo, el hundimiento que tuvo el bloque de concreto al dejarlo caer a diferentes alturas y la aplicación del estudio de (Trivedi, 2009), el cual correspondía al 10% del diámetro del ancho del área utilizada.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Densidad mínima y máxima

En los Anexo 14 y Anexo 15, se encuentran las tablas detalladas de los valores previos para el cálculo de las densidades máxima y mínima.

Tabla 4.1, resultado densidad mínima

Densidad Mínima	seco
Volumen Molde (cm ³)	718
Peso Muestra seca (g)	985,63
Densidad Mínima (kg/m ³)	1.373

Tabla 4.2, resultado densidad máxima

Densidad Máxima Método:	seco
Altura total molde (cm)	13,5
Altura final ensayo (cm)	11,71
Altura muestra H = (cm)	1,79
Área molde (cm ²)	311,35
Volumen muestra (cm ³)	556,55
Masa Muestra Seca (g)	1.038,75
Densidad seca Máxima (kg/m ³)	1.866

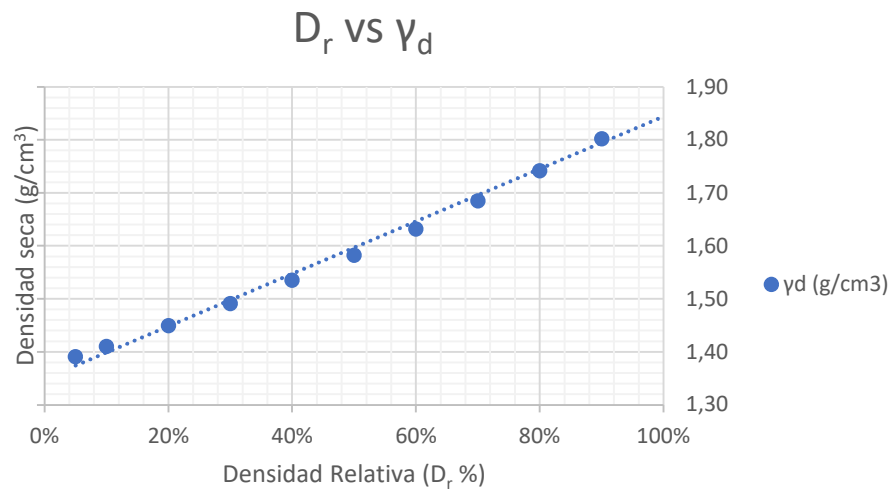
4.2 Densidad relativa

Tabla 4.3, resultado densidades relativas

$\rho_{mín}$ (g/m ³)	$\rho_{máx}$ (g/m ³)	D _r %	γ_d (g/cm ³)
1,37	1,87	5	1,39
1,37	1,87	10	1,41
1,37	1,87	20	1,45
1,37	1,87	30	1,49
1,37	1,87	40	1,54
1,37	1,87	50	1,58
1,37	1,87	60	1,63

1,37	1,87	70	1,69
1,37	1,87	80	1,74
1,37	1,87	90	1,80
1,37	1,87	100	1,87

Gráfica 4.1, Densidad relativa versus densidad seca



Se puede ver que la densidad tiene una clara tendencia lineal a medida que va aumentando la densidad relativa del material, va aumentando la densidad de la arena.

4.3 Hundimiento

4.3.1 Hundimiento en arena seca

Tabla 4.4, resultado ensayos de hundimiento acumulado para arena seca

D_r (%)	N° ensayos	50 cm	70 cm	100 cm
30	1	1,5	2,8	4,1
	2	2	3,5	5,5
	3	2,3	4,8	6
	4	3	5,2	6,5
	5	3,3	5,5	7
50	1	1,1	1,8	3,2
	2	1,8	2,5	3,7
	3	2,2	2,8	4,3
	4	2,6	3,5	4,9
	5	2,7	4,1	5,4
70	1	1	1,2	1,5
	2	1,2	1,4	1,8
	3	1,5	1,7	2,1

	4	1,8	2	2,3
	5	2,2	2,1	2,5
80	1	0,2	0,4	0,5
	2	0,4	0,5	0,8
	3	0,5	0,7	1
	4	0,5	0,8	1,2
	5	0,6	1,1	1,5

4.3.2 Hundimiento para arena con humedad igual a 2%

Tabla 4.5, resultado ensayos de hundimiento acumulado para arena con humedad igual a 2%

D _r (%)	S _r (%)	N° ensayos	50 cm	70 cm	100 cm
30	7	1	4,6	5,3	6,3
		2	5	5,6	6,7
		3	5,4	6,1	7,1
		4	5,7	6,4	7,5
		5	6,3	6,9	8,2
50	8	1	4	4,4	5,2
		2	4,3	4,8	5,6
		3	4,7	5,1	6
		4	5,2	5,4	6,3
		5	5,5	5,7	6,6
70	9	1	1,5	2,1	2,8
		2	1,8	2,5	3,2
		3	2,1	2,9	3,5
		4	2,4	3,1	3,9
		5	2,6	3,4	4,3
80	10	1	1,6	2,1	2,5
		2	2	2,4	2,9
		3	2,3	2,7	3,2
		4	2,6	3,1	3,6
		5	3,1	3,5	4,1

4.3.3 Hundimiento para arena con humedad igual a 5%

Tabla 4.6, resultado ensayos de hundimiento acumulado para arena con humedad igual a 5%

D _r (%)	S _r (%)	N° ensayos	50 cm	70 cm	100 cm
30	17	1	6,5	8,8	10,1
		2	7,8	9,5	10,6
		3	8,3	10,2	11,8
		4	9,6	10,8	12,6
		5	10,2	11,4	13,2

D _r (%)	S _r (%)	N° ensayos	50 cm	70 cm	100 cm
50	19	1	5,9	7,2	8,4
		2	6,4	7,7	8,9
		3	6,8	8,2	9,6
		4	7,4	8,6	10,3
		5	8,1	9,1	10,7
70	23	1	2	2,5	3,1
		2	2,3	3,1	3,6
		3	2,8	3,3	4,2
		4	3,2	3,7	4,7
		5	3,6	4,3	5,3
80	25	1	1,8	1,9	2,1
		2	2,4	2,3	2,4
		3	2,8	2,8	2,9
		4	3,1	3,1	3,3
		5	3,3	3,3	3,7

4.3.4 Hundimiento para arena con humedad igual a 7%

Tabla 4.7, resultado ensayos de hundimiento acumulado para arena con humedad igual a 7%

D _r (%)	S _r (%)	N° ensayos	50 cm	70 cm	100 cm
30	24	1	6,3	7,2	7,7
		2	6,9	7,5	8,1
		3	7,3	7,8	8,5
		4	7,6	8,2	8,9
		5	8	8,6	9,4
50	27	1	5,2	5,9	6,5
		2	5,6	6,3	6,9
		3	6	6,6	7,4
		4	6,4	7	7,7
		5	6,3	7,3	8,2
70	32	1	1,4	2,2	3
		2	1,7	2,5	3,4
		3	2,1	2,9	3,8
		4	2,3	3,3	4,1
		5	2,6	3,7	4,5
80	35	1	0,8	1,1	2
		2	1,3	1,5	2,3
		3	1,5	1,8	2,6
		4	1,8	2,2	3,1
		5	2	2,5	3,5

4.3.5 Hundimiento para arena con humedad igual a 10%

Tabla 4.8, resultado ensayos de hundimiento acumulado para arena con humedad igual a 10%

D _r (%)	S _r (%)	N° ensayos	50 cm	70 cm	100 cm
30	34	1	7,6	10,6	12,3
		2	8,2	11,2	12
		3	8,8	11,8	13,6
		4	9,4	12,6	14,1
		5	10,1	13,2	14,7
50	39	1	6,3	9,1	11
		2	6,9	9,7	11,4
		3	7,4	10,2	11,9
		4	8	10,8	12,5
		5	8,5	11,4	13,2
70	46	1	2,1	3,5	4,2
		2	2,3	3,9	4,9
		3	2,8	4,4	5,4
		4	3,2	5,7	5,8
		5	3,6	6,3	6,3
80	50	1	1,2	1,4	2,4
		2	1,5	1,8	2,7
		3	1,7	2,5	3,3
		4	2	2,9	3,8
		5	2,2	3,2	4,1

4.3.6 Hundimiento para arena con humedad igual a 15%

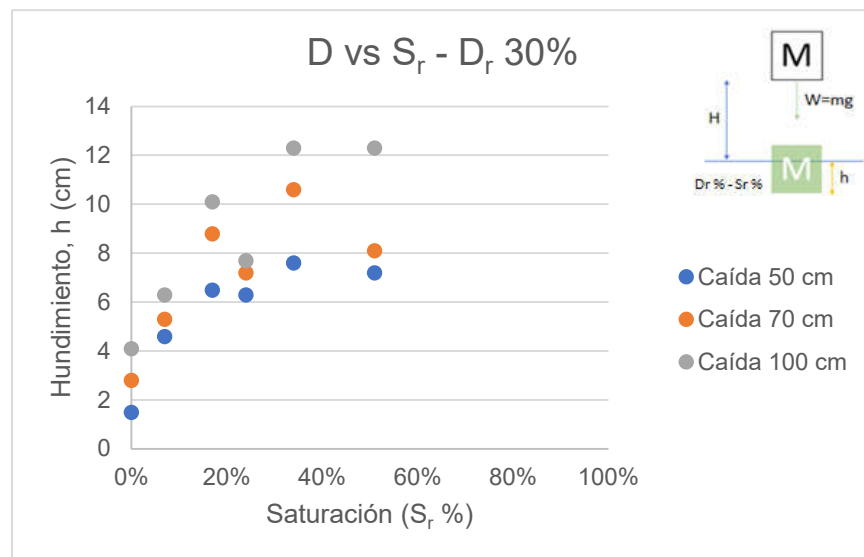
Tabla 4. 9, resultado ensayos de hundimiento acumulado para arena con humedad igual a 15%

D _r (%)	S _r (%)	N° ensayos	50 cm	70 cm	100 cm
30	51	1	7,2	8,1	12,3
		2	7,8	8,6	12,8
		3	8,3	9,2	13,4
		4	9,1	9,5	13,9
		5	9,4	10,3	14,5
50	58	1	5,7	7	10,8
		2	6,1	7,5	11,3
		3	6,6	7,9	11,7
		4	7,1	8,4	12,2
		5	7,4	9,2	12,8
70	70	1	3,3	3,9	4,7
		2	3,6	4,4	5,1
		3	4,2	4,8	5,5
		4	4,5	5,3	6,2
		5	5,1	5,7	6,6
80	75	1	1,5	2	2,8
		2	1,9	2,3	3,3

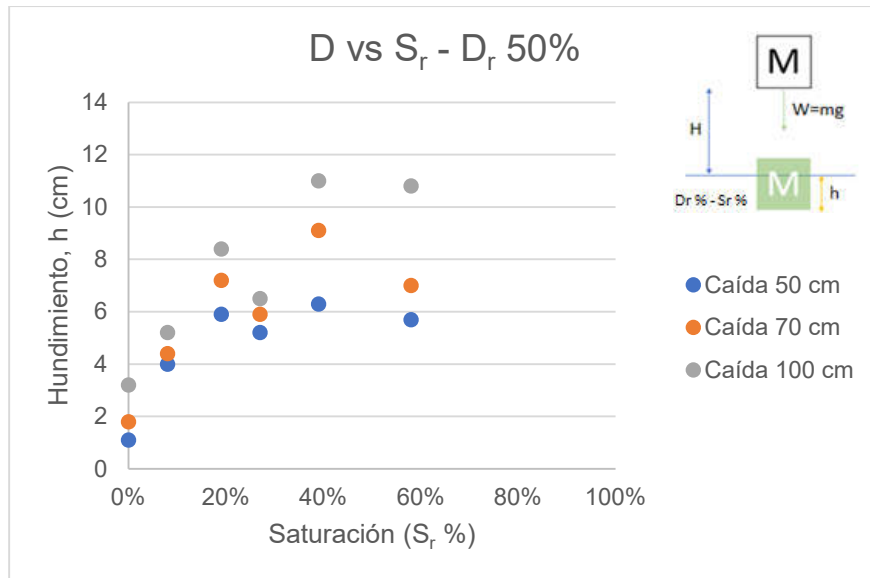
		3	2,4	2,7	3,7
		4	2,7	3,1	4,1
		5	3,2	3,5	4,4

Considerando las tablas anteriores y sus valores obtenidos, se hicieron los siguientes análisis para ver con detalle cómo se comporta el hundimiento a medida que aumenta la saturación de la arena, las gráficas fueron separadas por densidades relativas y se consideraron solo las primeras caídas de 50, 70 y 100 cm ya que fueron las que tuvieron un mayor cambio en la penetración de la arena ensayada. En los Anexo 16, Anexo 17 y Anexo 18, se puede ver las gráficas de hundimiento versus la densidad relativa para N° de caídas 1, 2 y 3; separadas también por altura de caída H de 50, 70 y 100 cm y por diferentes humedades.

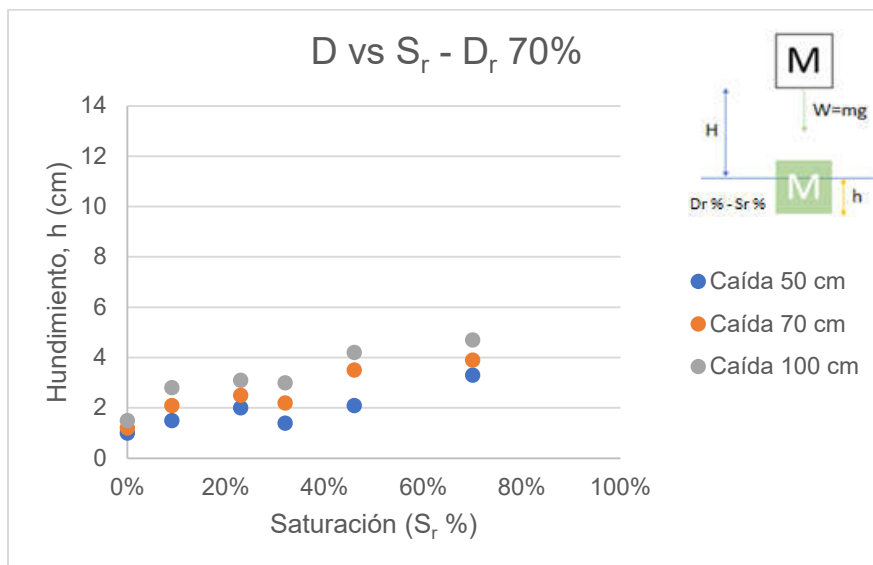
Gráfica 4.2, relación entre el hundimiento y la saturación, para una densidad relativa de 30%



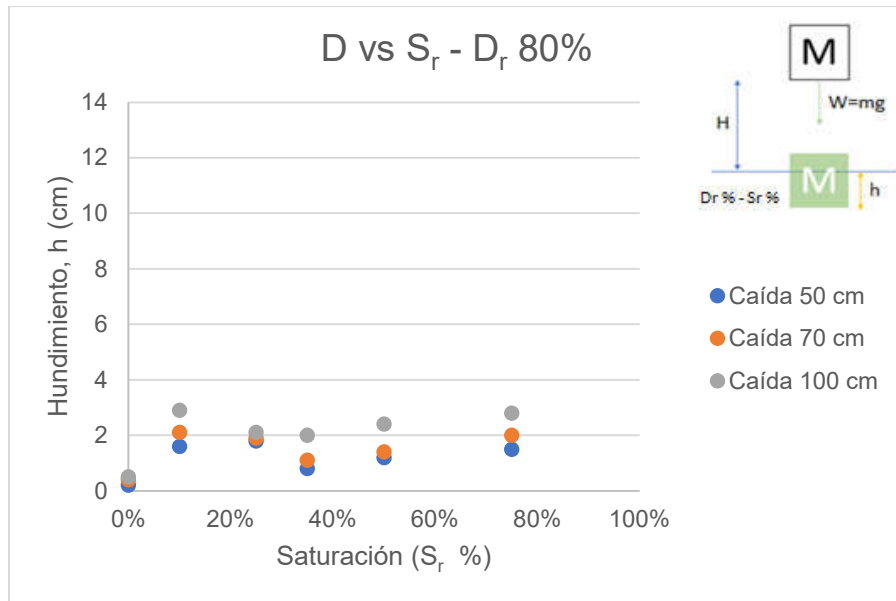
Gráfica 4.3, relación entre el hundimiento y la saturación, para una densidad relativa de 50%



Gráfica 4.4, relación entre el hundimiento y la saturación, para una densidad relativa de 70%



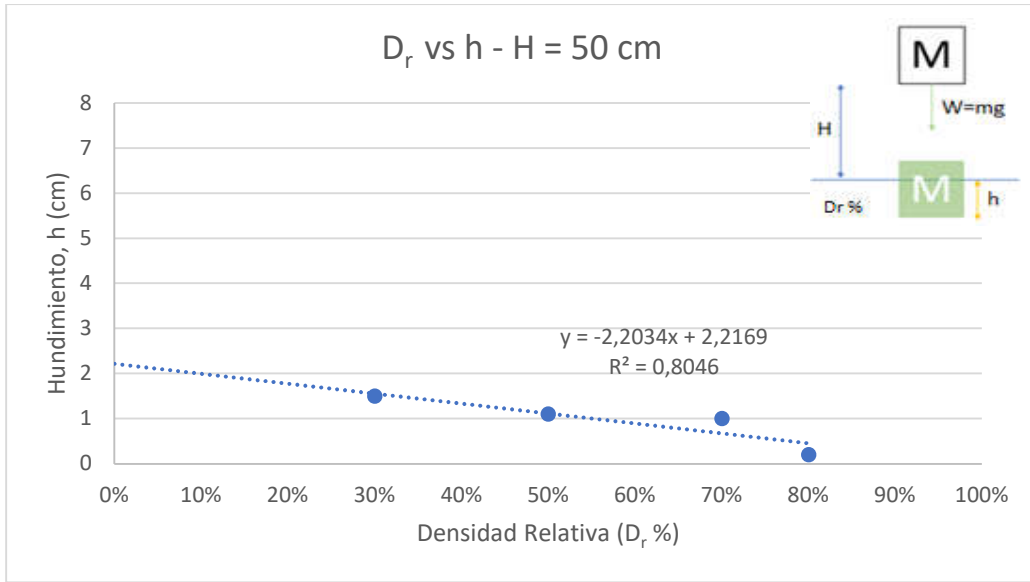
Gráfica 4.5, relación entre el hundimiento y la saturación, para una densidad relativa de 80%



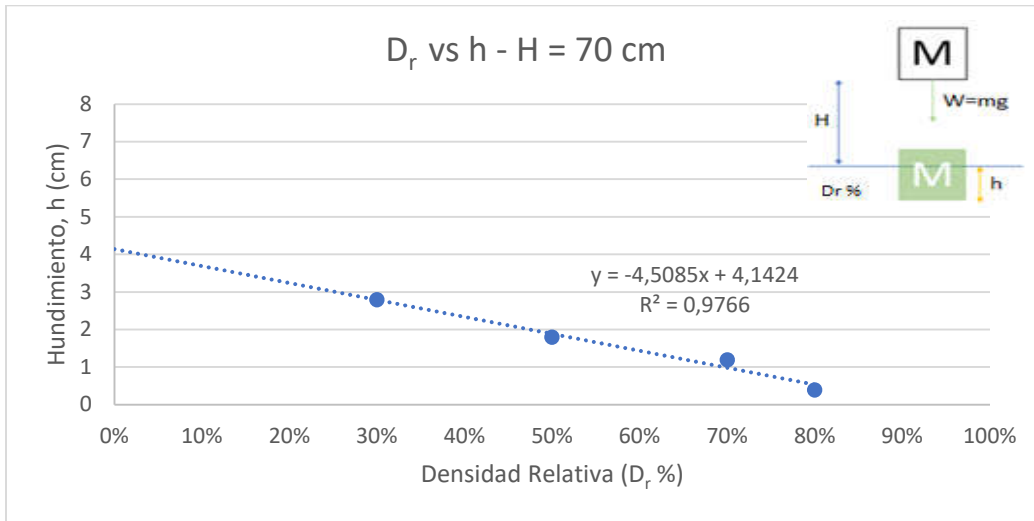
Analizando los datos de las gráficas anteriores con sus respectivas líneas de tendencia, se puede decir que los ensayos no tienen un comportamiento lineal, sus respuestas se puede inferir que, el hundimiento es creciente hasta cierto punto de saturación, luego se observa que no existe un hundimiento progresivo, el bloque de concreto se hunde menos que antes. Esto se debe a que el agua presente en la arena disminuye la fricción de las partículas que contrarrestaba la energía de impacto y por consiguiente el hundimiento, al existir mayor presencia de agua.

Cabe destacar también la respuesta de la arena seca con respecto a las diferentes densidades relativas y como esta responde frente a una caída de 50, 70 y 100 cm; en las siguientes gráficas, se identifica una relación lineal entre los datos, de lo anterior, se aprecia que, a mayor densidad relativa de la arena, menor será el hundimiento en esta.

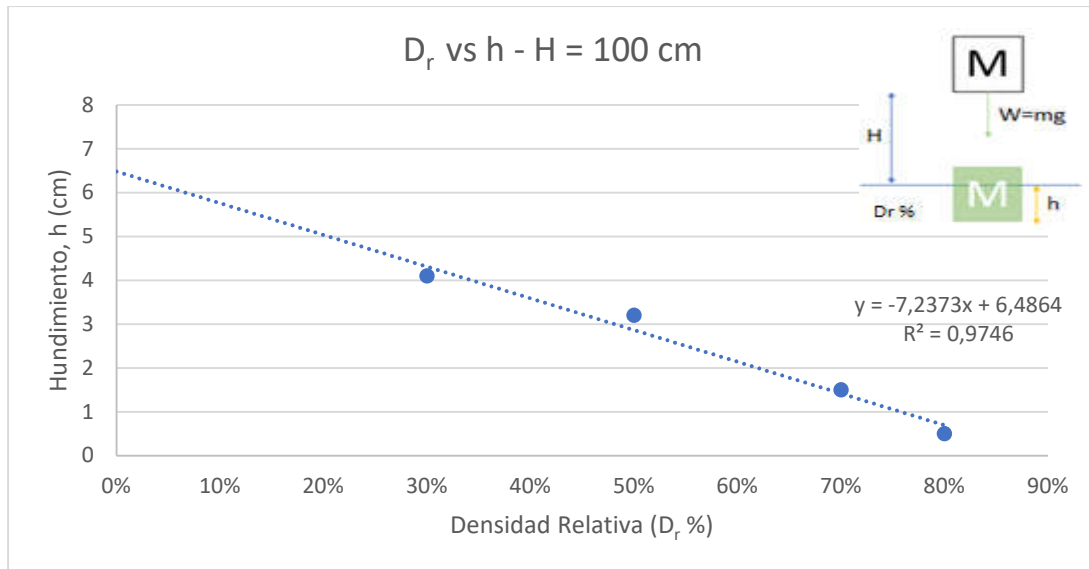
Gráfica 4.6, densidad relativa versus hundimiento, para una caída de 50 cm en arena seca



Gráfica 4.7, densidad relativa versus hundimiento, para una caída de 70 cm en arena seca



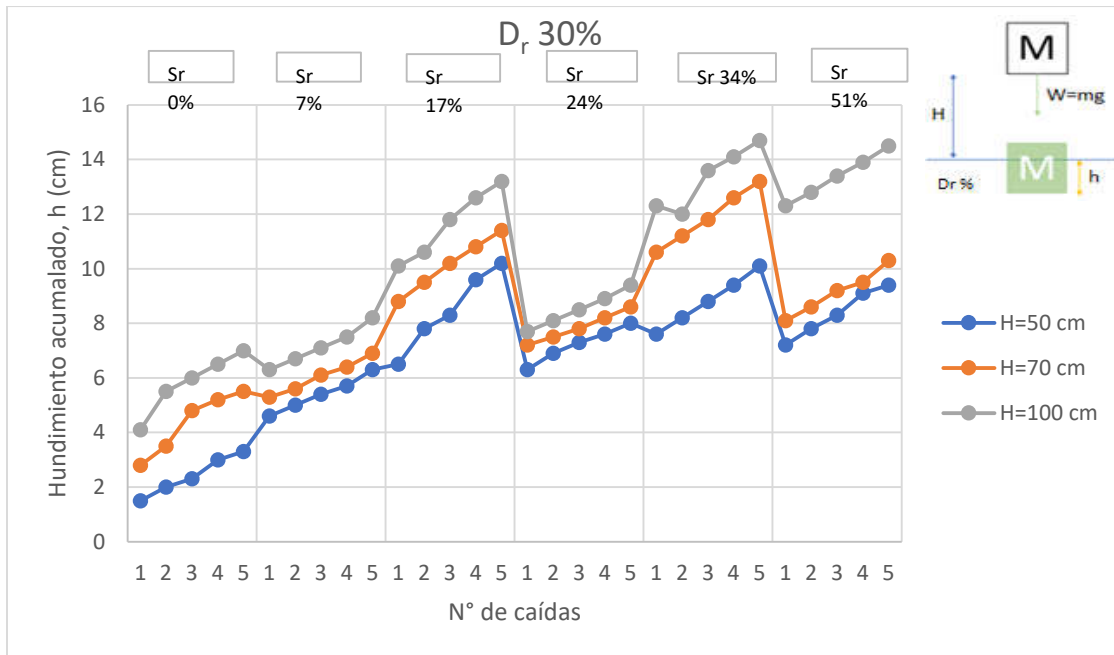
Gráfica 4.8, densidad relativa versus hundimiento, para una caída de 100 cm en arena seca



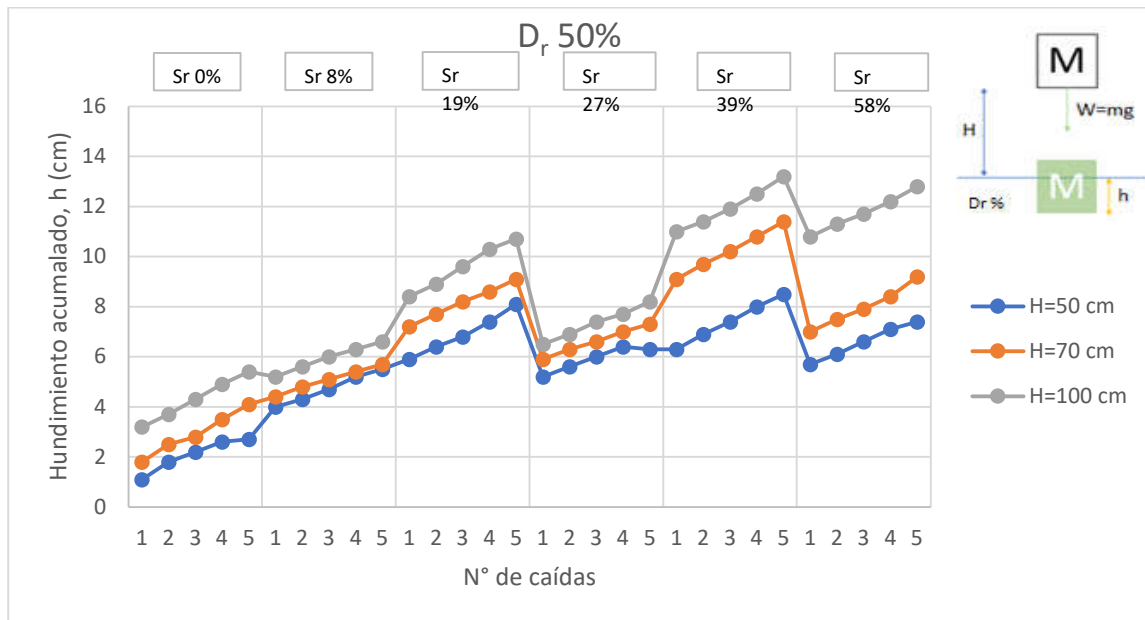
4.3.7 Relación entre hundimiento y número de caídas

Las siguientes graficas muestran la relación que existe entre el hundimiento y el número de caídas para diferentes alturas de lanzamiento que tiene el bloque de concreto sobre la arena. Estas graficas están separadas por distintas densidades relativas, en las cuales se observa que existe una relación directamente proporcional entre el hundimiento y el número de caídas, pero también se destaca que en cierto punto el bloque no tiene un hundimiento mayor que el anterior, esto se debe a que, al dejarlo caer continuamente en el mismo sitio, la arena se fue compactando debido al impacto de este. Por otro lado, también se ve reflejado que el hundimiento varía según la saturación (S_r %) que existe en la arena, se ve que, a mayor humedad, más penetrará el bloque en la arena. Pero solo hasta cierto punto, ya que en cierto momento el agua que está presente en la arena comienza a generar mayor presión de poros debilitando la energía de impacto.

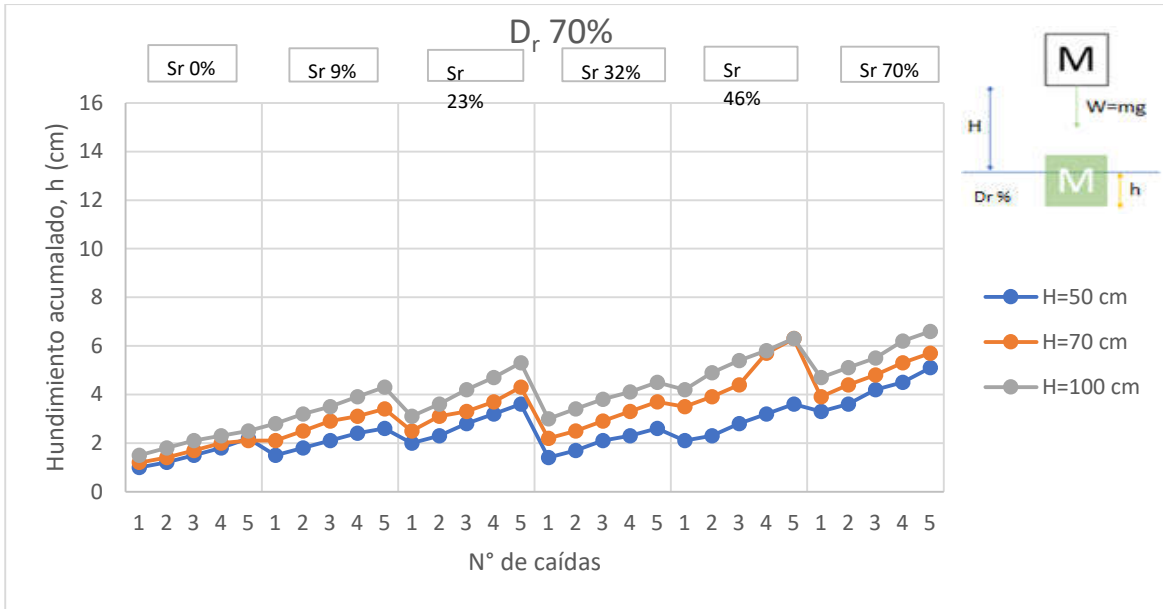
Gráfica 4.9, Relación hundimiento acumulado y N° de caídas para una densidad relativa de 30%



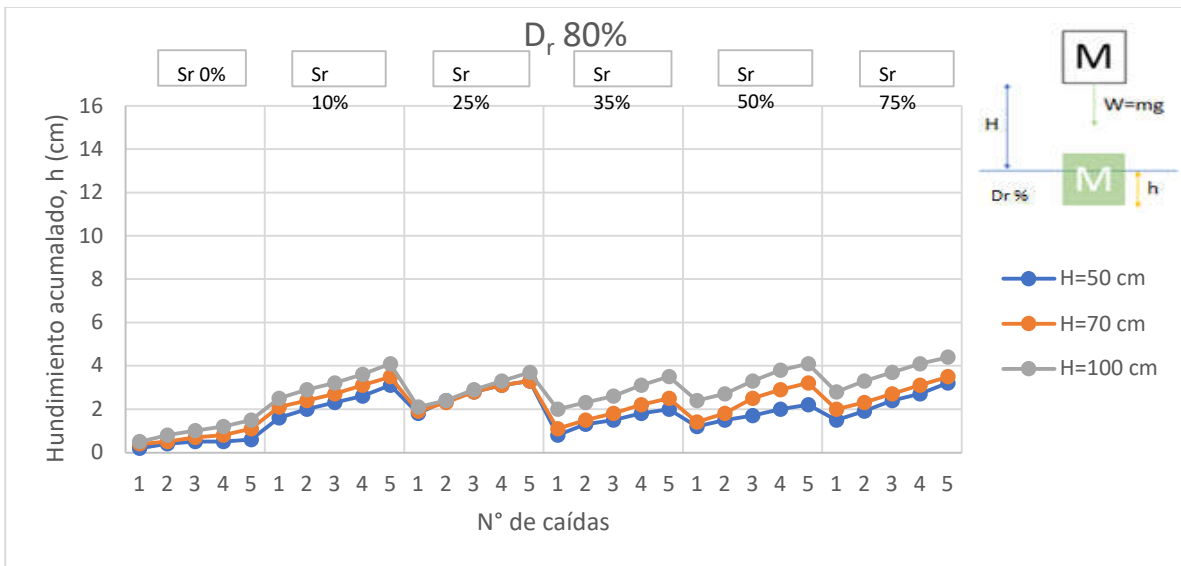
Gráfica 4.10, Relación hundimiento acumulado y N° de caídas para una densidad relativa de 50%



Gráfica 4.11, Relación hundimiento acumulado y N° de caídas para una densidad relativa de 70%



Gráfica 4.12, Relación hundimiento acumulado y N° de caídas para una densidad relativa de 80%

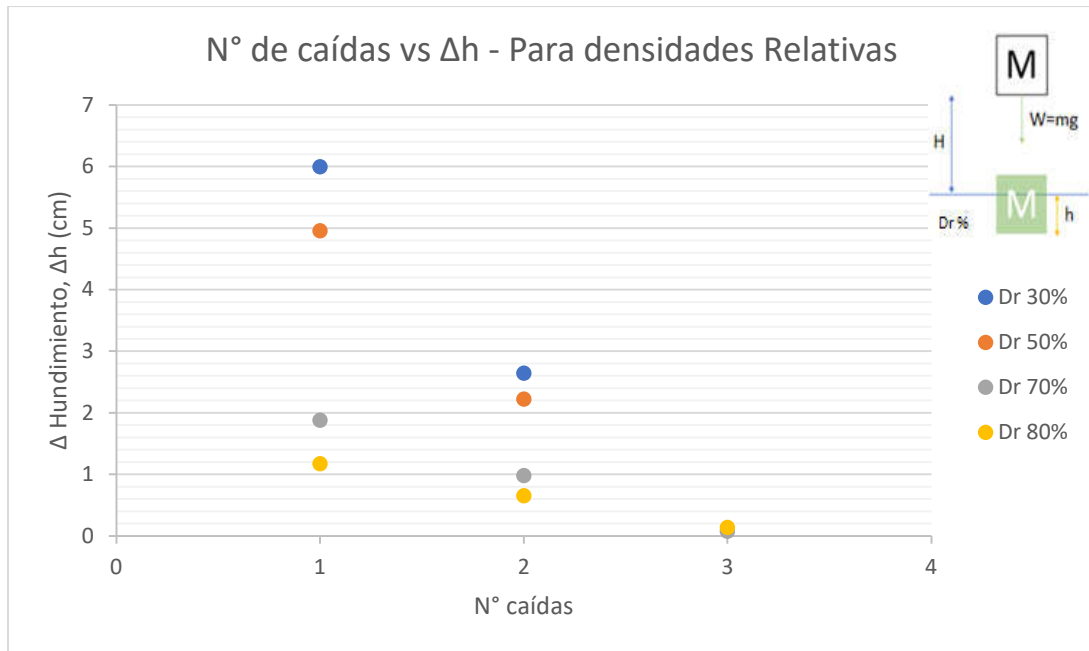


Tras analizar los valores mostrados anteriormente, se determinó que solo se usarán los valores hasta la tercera caída, esto debido a que luego de dejar caer del bloque de concreto sobre la arena ensayada, ocurre un fenómeno de hinchamiento perimetral del suelo, evidenciado por un ascenso lateral del material en el contorno del bloque.

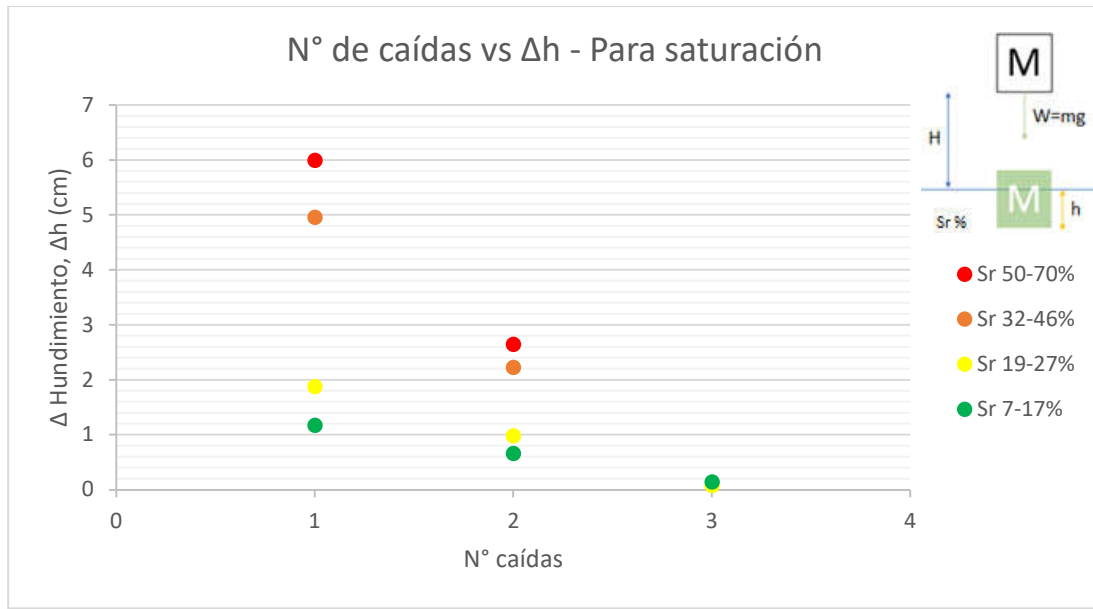
En el Anexo 19, se encuentra la tabla que contiene los valores donde se ve la diferencia de hundimiento entre caídas, para esta tabla se consideraron solo hasta la tercera caída de los datos mostrados anteriormente. A partir de esta tabla, se realizó la Gráfica 4.13, donde se muestra el promedio entre diferencia de caídas según el número de caídas, para diferentes densidades relativas. También a partir de esos valores se realizaron una serie de graficas (ver Anexo 20, Anexo 21 y Anexo 22) para llegar finalmente a la

Gráfica 4.14, donde se muestra el promedio de diferencia de hundimiento por número de caída, para diferentes rangos de saturación.

Gráfica 4.13, promedio de diferencia de hundimiento según N° de caídas para diferentes densidades relativas



Gráfica 4.14, promedio de diferencia de hundimiento según N° de caídas separadas por saturación



A través de las gráficas anteriores, se puede decir que, en la primera caída es donde se presenta un mayor hundimiento, pero este también varía según la densidad y la saturación existente en el suelo al momento de ser lanzado.

4.3.8 Relación entre energía de caída y hundimiento ($R_{E/h}$)

A través de los resultados de hundimiento, es posible establecer una relación entre la energía de caída (masa del cuerpo utilizado para la compactación dinámica y la altura en que este cuerpo cae) y el cambio volumétrico desarrollado por el suelo. Esta relación se obtuvo para las distintas densidades del experimento cálculo se separó por las distintas densidades relativas del experimento, considerando solo los hundimientos de las primeras caídas para las diferentes alturas (50, 70 y 100 cm).

Tabla 4.10, relación energía/hundimiento para una densidad relativa de 30%

D_r (%)	S_r (%)	Altura de Caída, H (cm)	Hundimiento, h (cm)	$R_{E/h}$
30	0	50	1,5	0,24
		70	2,8	0,38
		100	4,1	0,47
	7	50	4,6	0,75
		70	5,3	0,73
		100	6,3	0,72
	17	50	6,5	1,05
		70	8,8	1,21
		100	10,1	1,16

D _r (%)	S _r (%)	Altura de Caída, H (cm)	Hundimiento, h (cm)	R _{E/h}
	24	50	6,3	1,02
		70	7,2	0,99
		100	7,7	0,88
	34	50	7,6	1,23
		70	10,6	1,45
		100	12,3	1,41
	51	50	7,2	1,17
		70	8,1	1,11
		100	12,3	1,41

Tabla 4.11, relación energía/hundimiento para una densidad relativa de 50%

D _r (%)	S _r (%)	Altura de Caída, H (cm)	Hundimiento, h (cm)	R _{E/h}
50	0	50	1,1	0,18
		70	1,8	0,25
		100	3,2	0,37
	8	50	4	0,65
		70	4,4	0,60
		100	5,2	0,60
	19	50	5,9	0,96
		70	7,2	0,99
		100	8,4	0,96
	27	50	5,2	0,84
		70	5,9	0,81
		100	6,5	0,75
	39	50	6,3	1,02
		70	9,1	1,25
		100	11	1,26
	58	50	5,7	0,92
		70	7	0,96
		100	10,8	1,24

Tabla 4.12, relación energía/hundimiento para una densidad relativa de 70%

D _r (%)	S _r (%)	Altura de Caída, H (cm)	Hundimiento, h (cm)	R _{E/h}
70	0	50	1	0,16
		70	1,2	0,16
		100	1,5	0,17
	9	50	1,5	0,24

D _r (%)	S _r (%)	Altura de Caída, H (cm)	Hundimiento, h (cm)	R _{E/h}
		70	2,1	0,29
		100	2,8	0,32
		50	2	0,32
	23	70	2,5	0,34
		100	3,1	0,36
		50	1,4	0,23
	32	70	2,2	0,30
		100	3	0,34
		50	2,1	0,34
	46	70	3,5	0,48
		100	4,2	0,48
		50	3,3	0,54
	70	70	3,9	0,53
		100	4,7	0,54

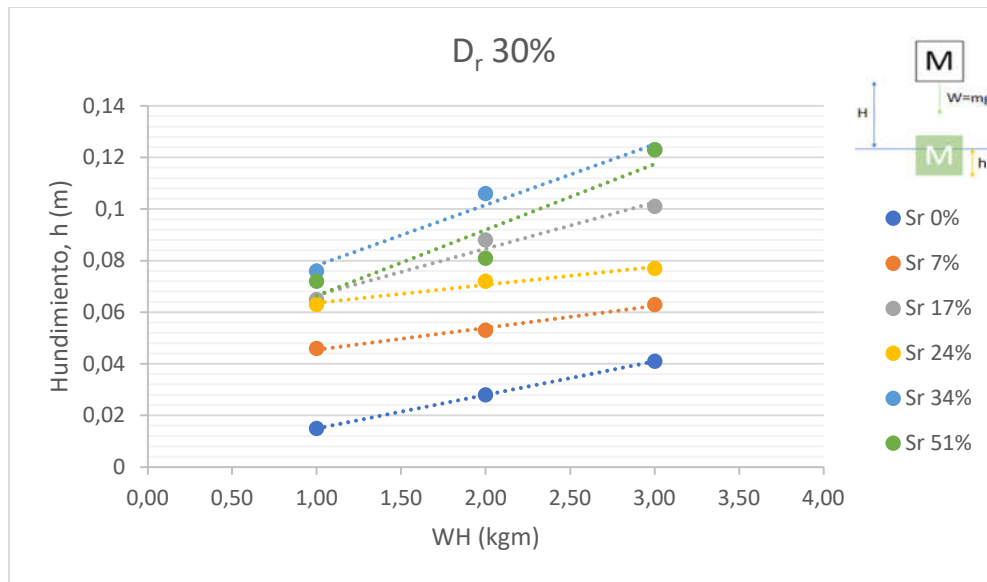
Tabla 4.13, relación energía/hundimiento para una densidad relativa de 80%

D _r (%)	S _r (%)	Altura de Caída, H (cm)	Hundimiento, h (cm)	R _{E/h}
80	0	50	0,2	0,4
		70	0,4	0,5
		100	0,5	0,7
	10	50	1,6	2,1
		70	2,1	2,4
		100	2,9	2,7
	25	50	1,8	1,9
		70	1,9	2,3
		100	2,1	2,8
	35	50	0,8	1,1
		70	1,1	1,5
		100	2	1,8
	50	50	1,2	1,4
		70	1,4	1,8
		100	2,4	2,5
	75	50	1,5	2
		70	2	2,3
		100	2,8	2,7

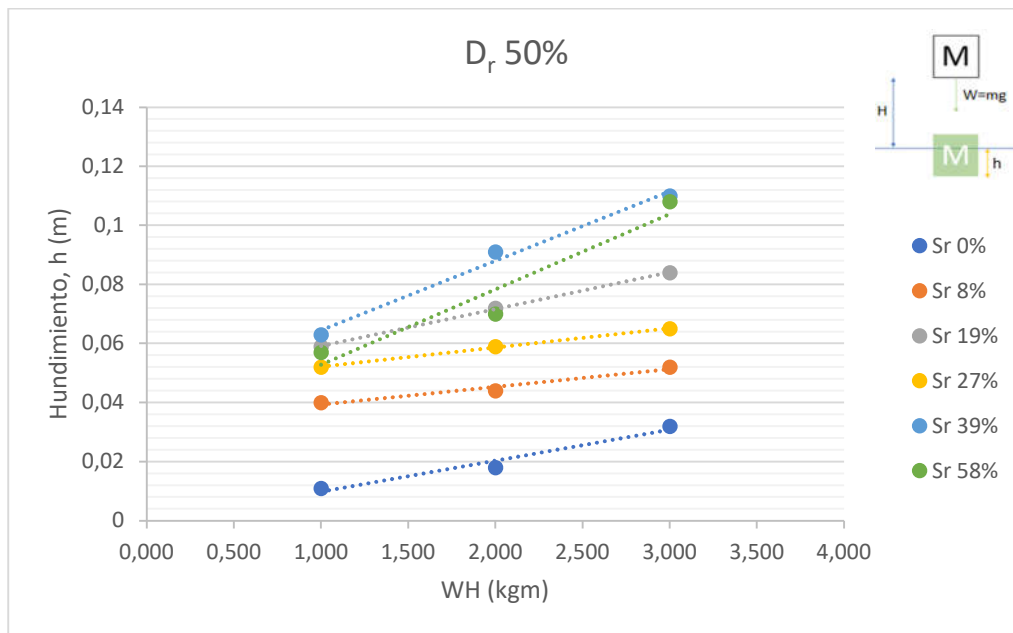
Con las tablas anteriores se realizaron las siguientes gráficas, donde se ve la relación entre el hundimiento (h) y la energía (WH), y donde la pendiente de los puntos graficados

para cada tipo de saturación (S_r %) mostraría el valor del coeficiente empírico $R_{E/h}$ experimental. Cabe destacar que cada grafica esta separa por densidad relativa, tal como se muestra en las tablas anteriores.

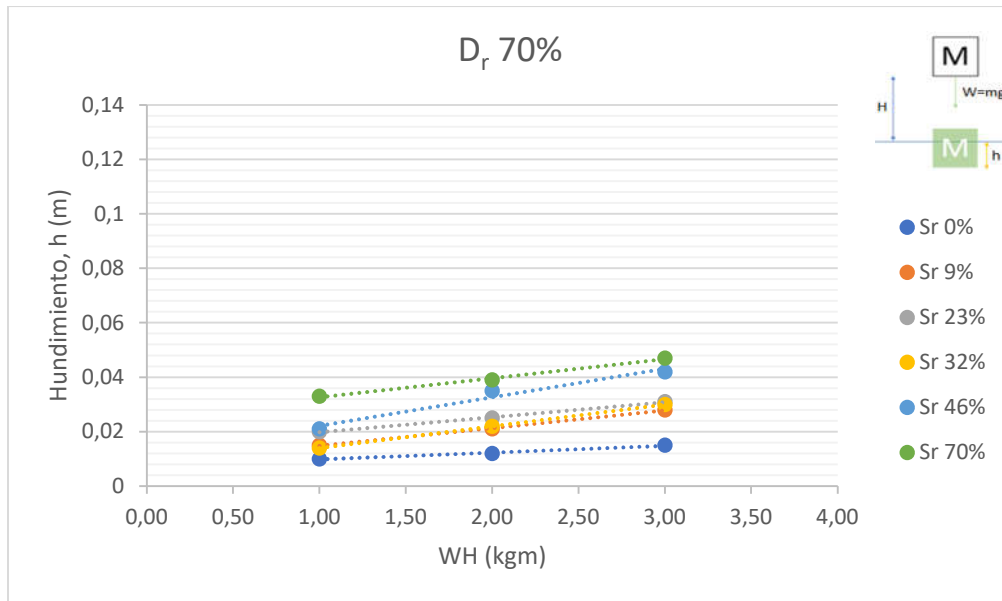
Gráfica 4.15, energía (WH) versus hundimiento, para diferentes tipos de saturación y una densidad relativa de 30%



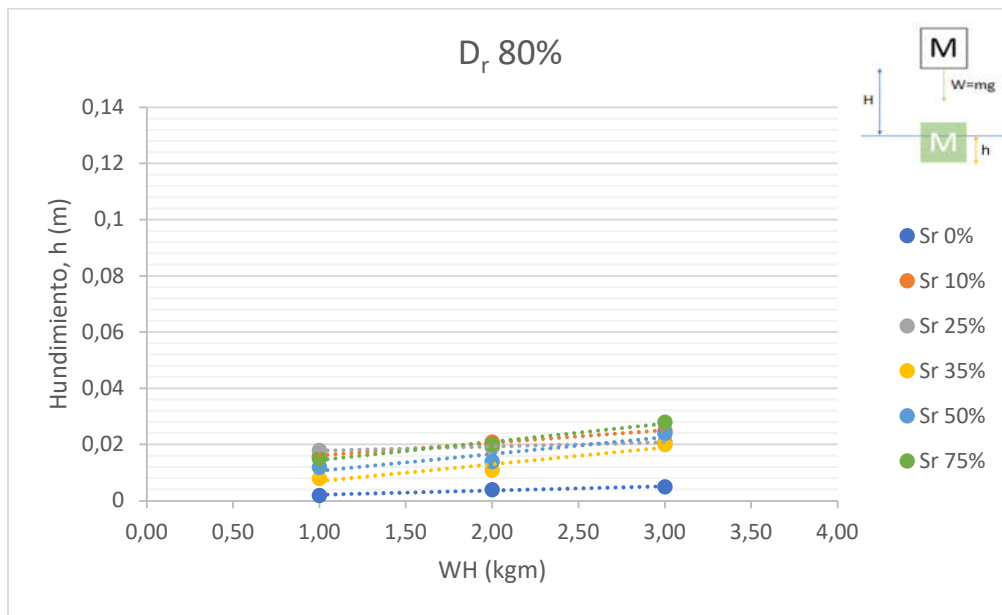
Gráfica 4.16, energía (WH) versus hundimiento, para diferentes tipos de saturación y una densidad relativa de 50%



Gráfica 4.17, energía (WH) versus hundimiento, para diferentes tipos de saturación y una densidad relativa de 70%

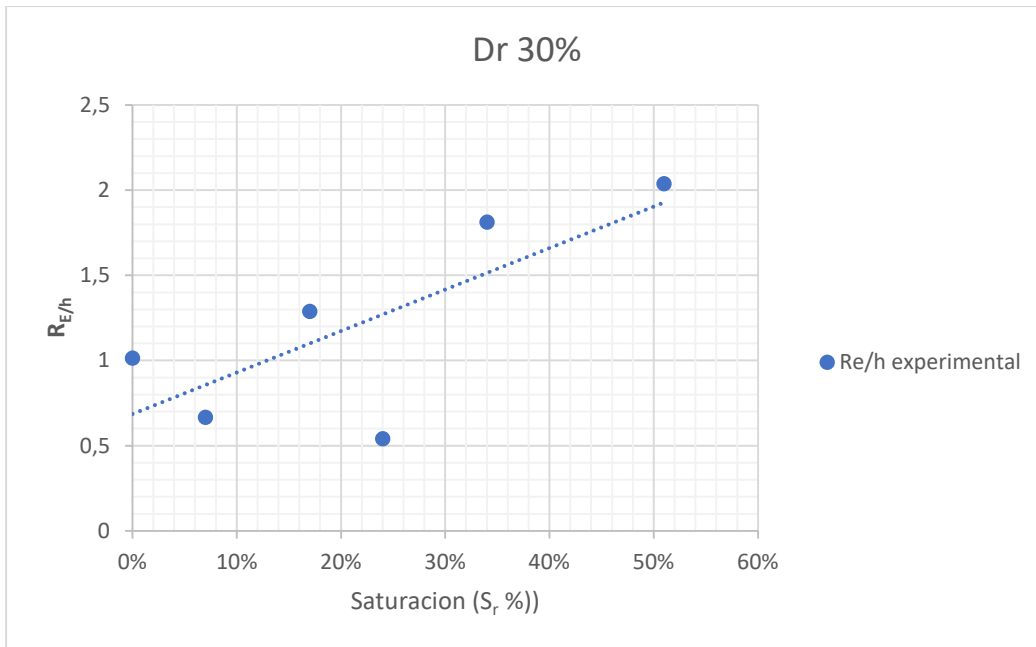


Gráfica 4.18, energía (WH) versus hundimiento, para diferentes tipos de saturación y una densidad relativa de 80%.

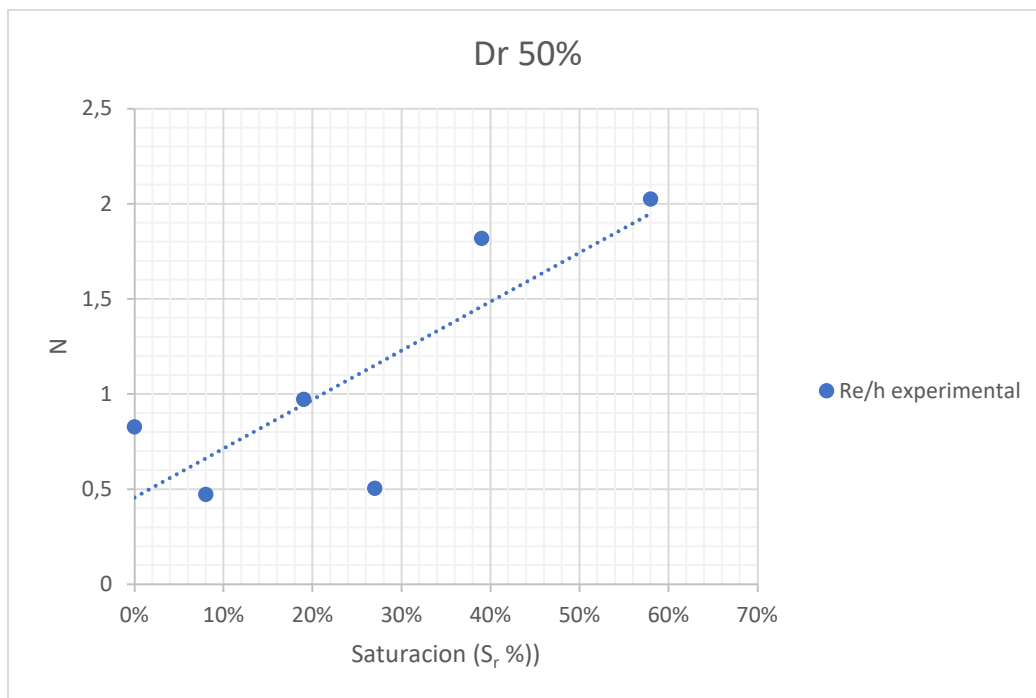


Finalmente, se puede ver con claridad la relación entre $R_{E/h}$ y la saturación (Sr %) de la arena. En las siguientes graficas se muestran los resultados, los cuales están separados por densidades relativas.

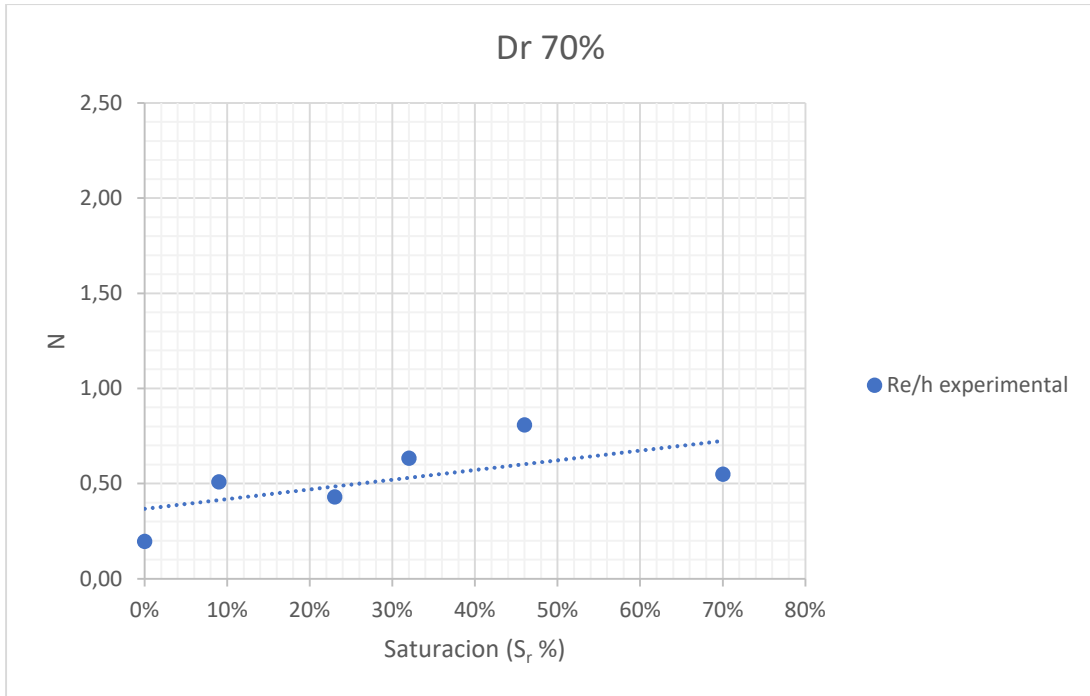
Gráfica 4.19, $R_{E/h}$ experimental, para una densidad relativa de 30%



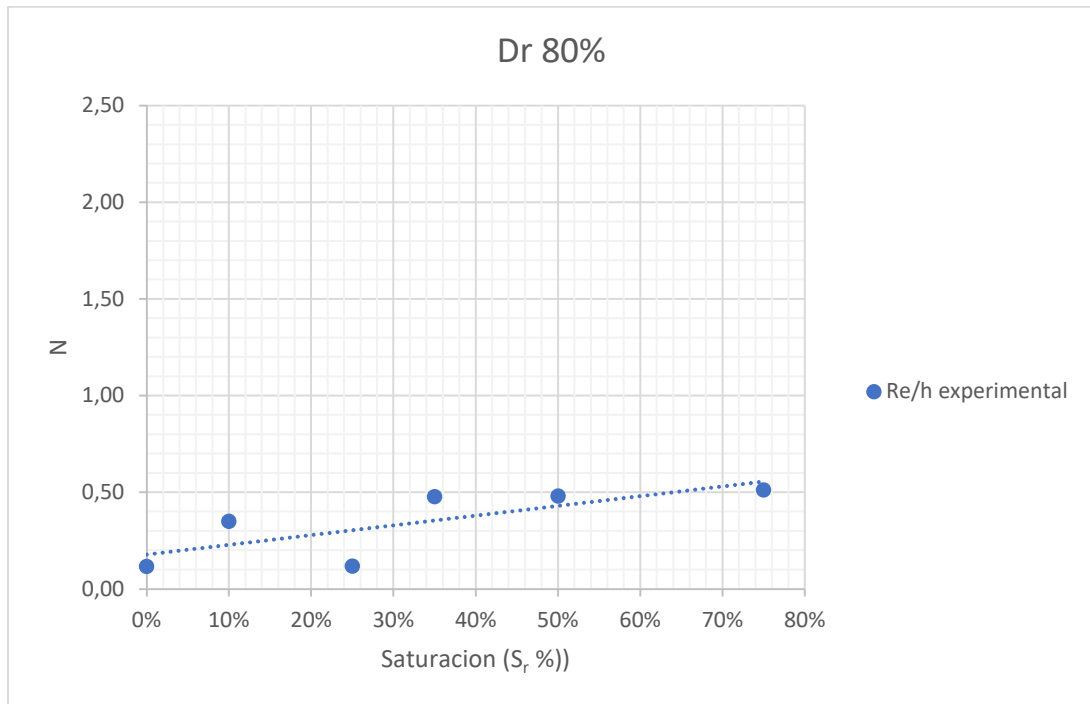
Gráfica 4.20, $R_{E/h}$ experimental, para una densidad relativa de 50%



Gráfica 4.21, $R_{E/h}$ experimental, para una densidad relativa de 70%



Gráfica 4.22 Re/h experimental, para una densidad relativa de 80%



4.4 Capacidad de carga

4.4.1 Capacidad de carga de Terzagui

El cálculo de capacidad de carga de Terzagui fue hecho a partir de la reacción del suelo a una altura $H=0$ y una profundidad $h=0$, por ende, se evalúa cuanta es la capacidad de carga última a ras de suelo para diferentes densidades relativas y sus respectivos valores relacionados de densidad y ángulo de fricción.

Tabla 4.14, Capacidad de carga de Terzagui

D_r (%)	γ_d (kg/m ³)	Ángulo Fricción (ϕ)	N_γ	q_u (kg/m ²)
5	1391,43	32	28,78	2402,72
10	1410,36	32	28,78	2435,40
20	1449,80	32	28,78	2503,52
30	1491,52	32	28,78	2575,55
40	1535,70	33	33,32	3070,18
50	1582,59	33	33,32	3163,91
60	1632,42	34	36	3526,04
70	1685,50	35	42,4	4287,92
80	1742,15	36	54	5644,56
90	1802,73	37	65,6	7095,56
100	1867,69	38	77,2	8651,12

4.4.2 Capacidad de carga de Meyerhof

Tabla 4.15, Capacidad de carga de Meyerhof

D_r (%)	γ_d (kg/m ³)	Ángulo Fricción (ϕ)	N_γ	s_γ	d_γ	q_u (kg/m ²)
5	1391,43	32	22	1,03	1,00	2359,26
10	1410,36	32	22	1,03	1,00	2391,35
20	1449,80	32	22	1,03	1,00	2458,23
30	1491,52	32	22	1,03	1,00	2528,96
40	1535,70	33	24,94	1,03	1,00	2949,89
50	1582,59	33	24,94	1,03	1,00	3039,95
60	1632,42	34	31,1	1,03	1,00	3907,44
70	1685,50	35	36,93	1,03	1,00	4787,73
80	1742,15	36	44,4	1,03	1,00	5944,59
90	1802,73	37	56,10	1,02	1,00	7766,25
100	1867,69	38	64	1,02	1,00	9171,82

4.4.3 Capacidad de carga lenta experimental

Para el siguiente apartado, solo se consideraron las dos primeras caídas de 50 y 70 cm, para densidades relativas de 20, 30 y 40%, lo anterior se debe a que solo bajo estas condiciones se pudo replicar el hundimiento vía carga gradual.

Esta serie de experimentos buscó identificar la potencial la carga necesaria para generar un desplazamiento en la arena y lograr hundir el bloque de concreto hasta los niveles de hundimiento registrados en las pruebas de impacto. El experimento entrego los siguientes resultados:

Tabla 4.16, carga necesaria para que existe el mismo hundimiento en cada primera caída de 50 y 70 cm

w (%)	D _r (%)	S _r (%)	Hundimiento, h (cm) para		Carga gradual máxima para generar Hundimiento (kg)	
			Caída 50 cm	Caída 70 cm	Caída 50 cm	Caída 70 cm
5	20	16	7,3	9,5	65,9	110,3
	30	17	6,5	8,8	53,4	90,3
	40	18	5,4	6,7	63,9	90,3
10	20	32	8,2	10,7	106,3	129,8
	30	34	7,6	10,6	96,3	129,8
	40	36	6	7,7	76,3	96,3
15	20	48	8,5	9,8	129,8	140,2
	30	51	7,2	8,1	90,3	124,9
	40	55	6	7,4	79,9	90,3

De los datos recolectados con el experimento se observa cuanto es el avance de hundimiento que hay entre la caída de 50 y 70 cm, considerando la misma saturación en ambos casos.

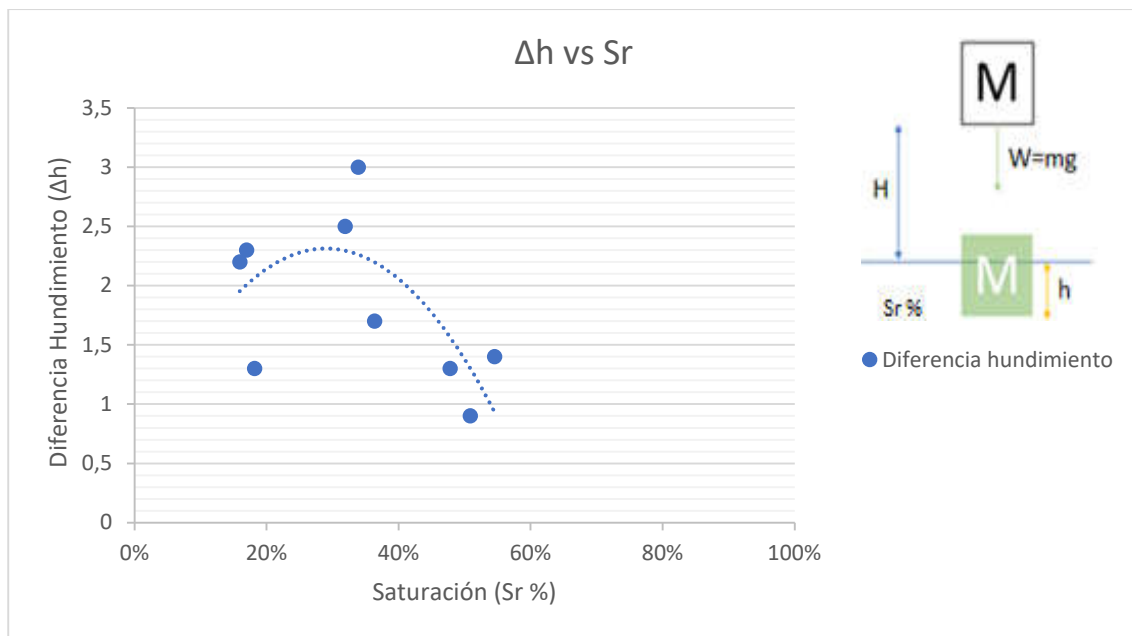
Tabla 4.17, diferencia de hundimiento entre ensayos

w (%)	D _r (%)	S _r (%)	Hundimiento, h (cm) para		Diferencia Hundimiento (Δh cm)
			Caída 50 cm	Caída 70 cm	
5	20	16	7,3	9,5	2,2
5	30	17	6,5	8,8	2,3
5	40	18	5,4	6,7	1,3
10	20	32	8,2	10,7	2,5
10	30	34	7,6	10,6	3
10	40	36	6	7,7	1,7

w (%)	D _r (%)	S _r (%)	Hundimiento, h (cm) para		Diferencia Hundimiento (Δh cm)
			Caída 50 cm	Caída 70 cm	
15	20	48	8,5	9,8	1,3
15	30	51	7,2	8,1	0,9
15	40	55	6	7,4	1,4

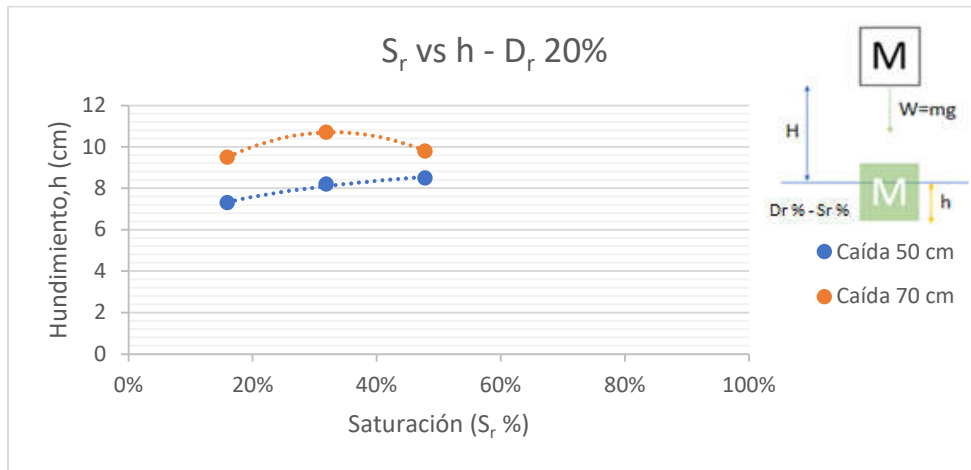
En la Gráfica 4.23 se observa que el hundimiento es progresivo hasta llegar a una saturación de 34%, posterior a esto, el hundimiento va en descenso debido a la presencia de agua en la arena, esta impide que las partículas se deformen, generando mayor presión en el poro e impidiendo que se reagrupen con la energía aplicada de la carga.

Gráfica 4.23, Diferencia de hundimiento versus saturación en la arena

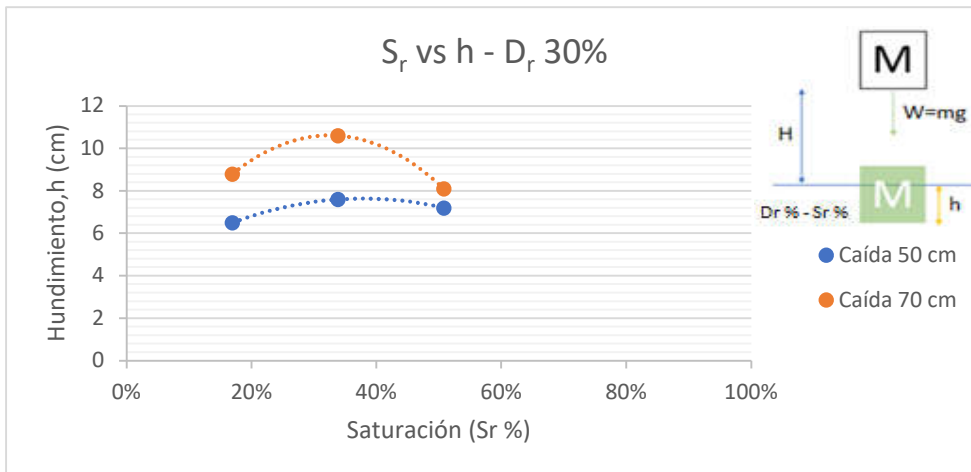


Este comportamiento se puede ver con mayor claridad al separar los datos (ver Tabla 4.16), A continuación, se evidencia que en las gráficas existe un punto máximo, donde el hundimiento es mayor, para luego decaer, es decir, ocurre un punto de inflexión en donde los datos recopilados no tienen un comportamiento del todo lineal, a consecuencia de la presencia de agua en la arena, ya que, un suelo muy saturado no reacciona de igual forma, lo que genera una mayor presión de poros, provoca una amortiguación de la energía de impacto y haciendo que este no se hunda tanto como antes.

Gráfica 4.24, saturación versus hundimiento para arena con una densidad relativa de 20%



Gráfica 4.25, saturación versus hundimiento para arena con una densidad relativa de 30%



Gráfica 4.26, saturación versus hundimiento para arena con una densidad relativa de 40%

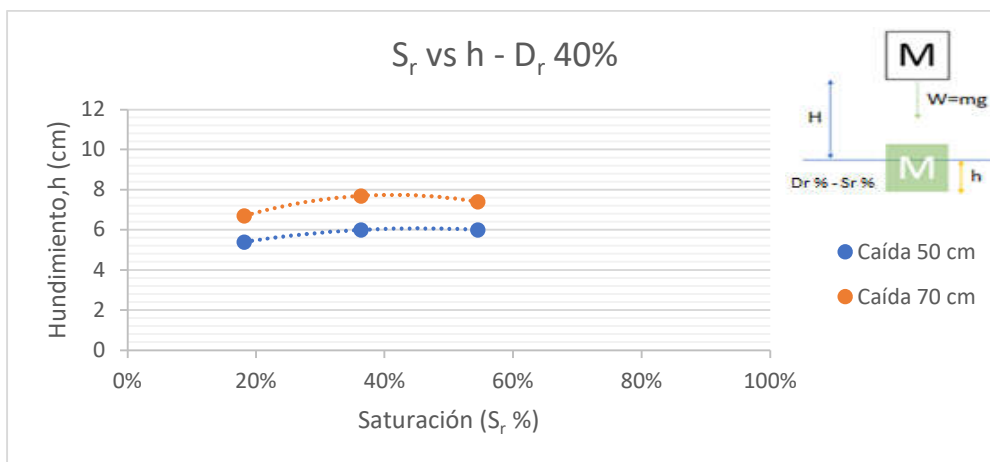
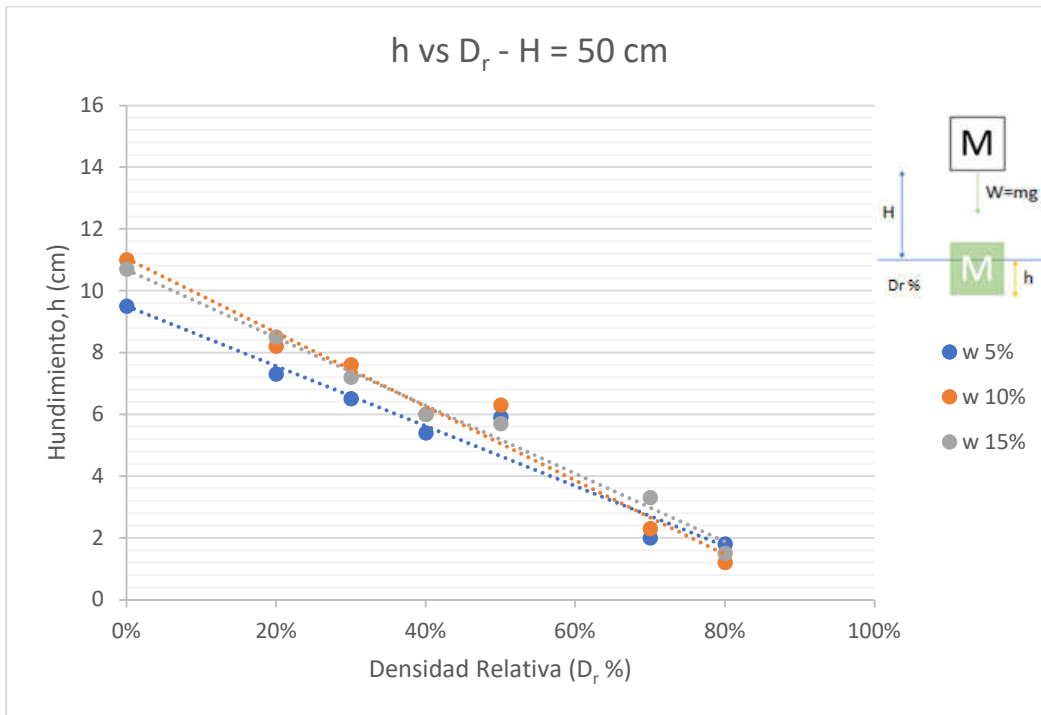


Tabla 4.18, variabilidad de hundimiento del suelo para distintas densidades relativas según altura de caída de 50 y 70 cm

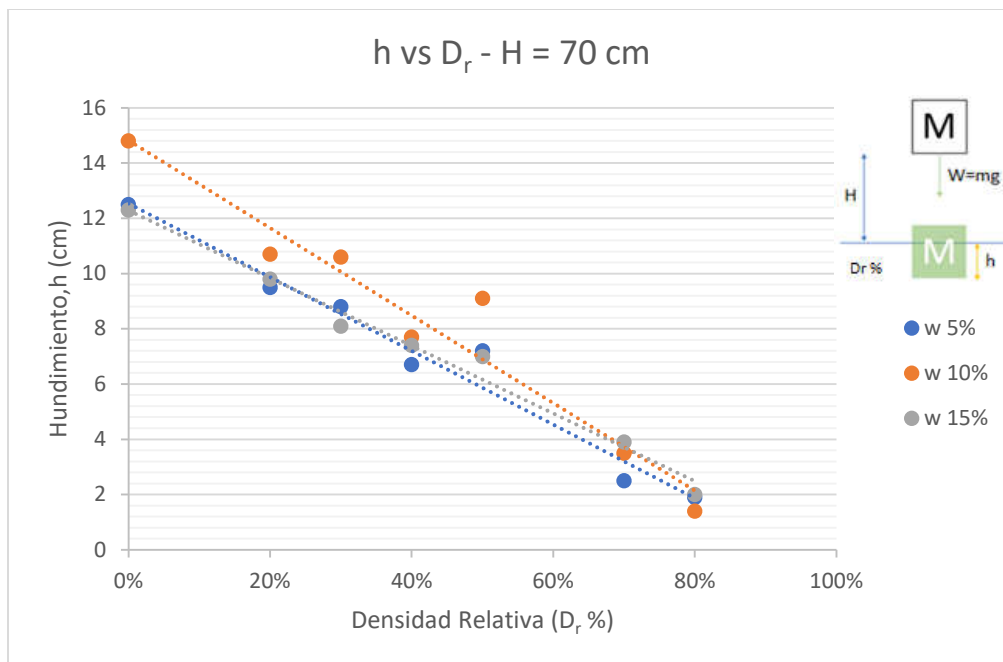
w (%)	D _r (%)	Hundimiento, h (cm) para	
		Caída 50 cm	Caída 70 cm
5	0	9,5	12,5
	20	7,3	9,5
	30	6,5	8,8
	40	5,4	6,7
	50	5,9	7,2
	70	2	2,5
	80	1,8	1,9
10	0	11	14,8
	20	8,2	10,7
	30	7,6	10,6
	40	6	7,7
	50	6,3	9,1
	70	2,3	3,5
	80	1,2	1,4
15	0	10,7	12,3
	20	8,5	9,8
	30	7,2	8,1
	40	6	7,4
	50	5,7	7
	70	3,3	3,9
	80	1,5	2

Las siguientes gráficas, reflejan cómo reacciona el hundimiento en la arena a medida que la densidad relativa va aumentando.

Gráfica 4.27, relación entre hundimiento y densidad relativa para una caída de 50 cm



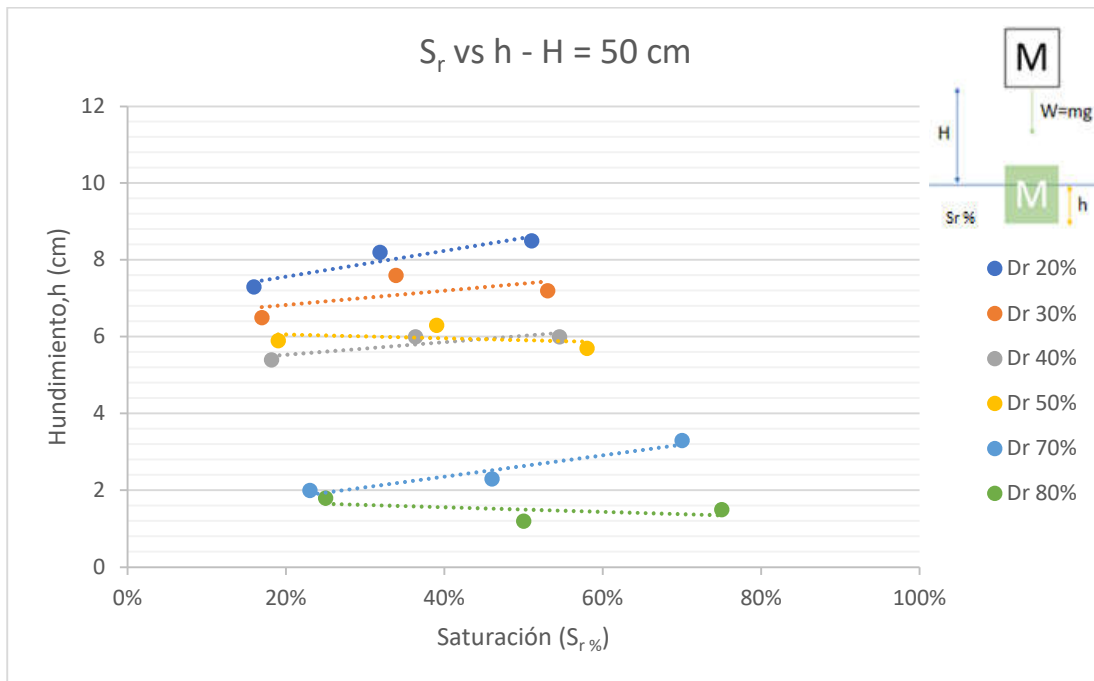
Gráfica 4.28, relación entre hundimiento y densidad relativa para una caída de 70 cm



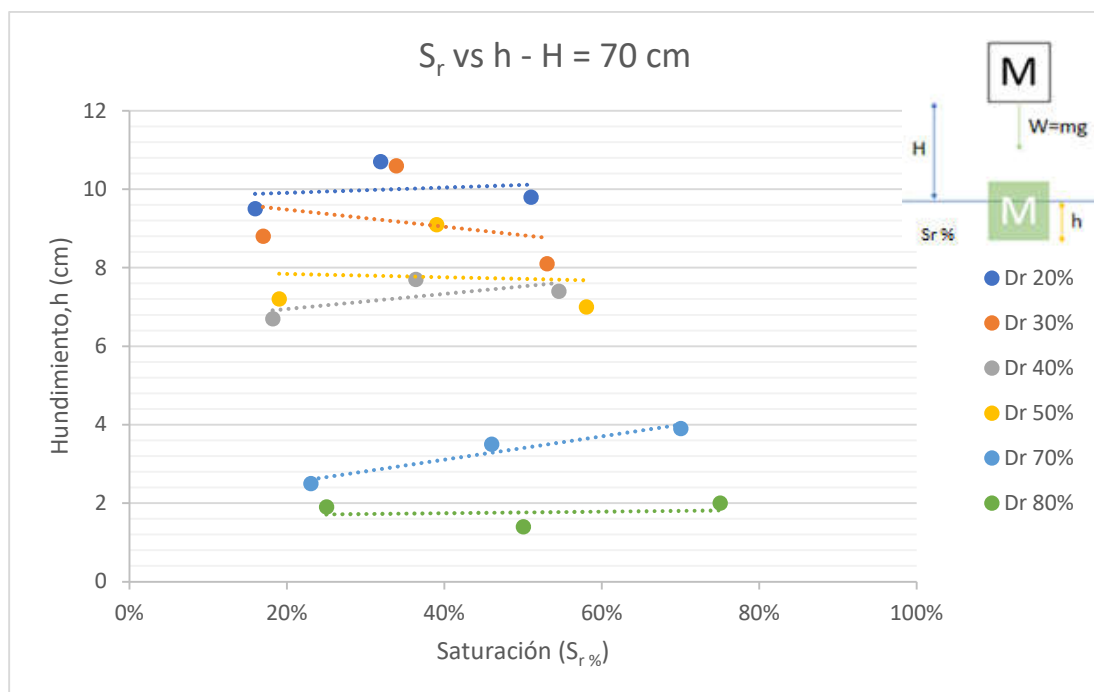
Por otro lado, si consideramos los mismos valores anteriores, pero los reagrupamos por densidad relativa y comparamos la respuesta del hundimiento según la saturación de la arena. Se puede ver en las siguientes gráficas, que existe un comportamiento casi

constante, en donde a medida que aumenta la saturación, aumenta levemente el hundimiento del bloque de concreto. Se puede decir que la dependencia es mayormente dada por la densidad relativa y no por el grado de saturación de la arena.

Gráfica 4.29, saturación versus hundimiento para una caída de 50 cm



Gráfica 4.30, saturación versus hundimiento para una caída de 70 cm



4.4.4 Capacidad de carga experimental vs teórica

La capacidad de carga aplicada en el experimento dio como resultados cargas en kilogramos, estas fueron transformadas a tensión (kg/m^2), lo cual fue resultados de dividir la carga en kilos por el área del bloque utilizado en las pruebas, todas las medidas se dejaron en KPa.

Tabla 4.19, tensión asociada a la carga gradual Máxima aplicada para replicar el hundimiento para caídas de 50 y 70 cm

			Hundimiento por caída (cm)		Carga gradual máxima para generar Hundimiento (kg)		Tensión (KPa)	
w (%)	D _r (%)	S _r (%)	Caída 50 cm	Caída 70 cm	Caída 50 cm	Caída 70 cm	Caída 50 cm	Caída 70 cm
5	20	16	7,3	9,5	65,9	110,3	28,73	48,09
	30	17	6,5	8,8	53,4	90,3	23,28	39,37
	40	18	5,4	6,7	63,9	90,3	27,86	39,37
10	20	32	8,2	10,7	106,3	129,8	46,35	56,59
	30	34	7,6	10,6	96,3	129,8	41,99	56,59
	40	36	6	7,7	76,3	96,3	33,27	41,99
15	20	48	8,5	9,8	129,8	140,2	56,59	61,13
	30	51	7,2	8,1	90,3	124,9	39,37	54,46
	40	55	6	7,4	79,9	90,3	34,84	39,37

Tabla 4.20, Capacidad de carga de Meyerhof y Terzagui para hundimiento en caídas de 50 y 70 cm

			Hundimiento por caída (cm)		MEYERHOF		TERZAGUI	
					Capacidad de carga (KPa)		Capacidad de carga (KPa)	
w (%)	D _r (%)	S _r (%)	Caída 50 cm	Caída 70 cm	Caída 50 cm	Caída 70 cm	Caída 50 cm	Caída 70 cm
5	20	16	7,3	9,5	25,39	33,28	31,21	40,62
	30	17	6,5	8,8	23,19	31,64	28,59	38,71
	40	18	5,4	6,7	21,28	26,51	27,53	34,16
10	20	32	8,2	10,7	28,60	37,64	35,06	45,75
	30	34	7,6	10,6	27,22	38,35	33,43	46,62
	40	36	6	7,7	23,69	30,57	30,59	39,26
15	20	48	8,5	9,8	29,68	34,37	36,34	41,90
	30	51	7,2	8,1	25,75	29,06	31,67	35,63
	40	55	6	7,4	23,69	29,35	30,59	37,73

Tabla 4.21, diferencias entre capacidad de carga por hundimiento y superficial entre Meyerhof y Terzagui

S _r (%)	Hundimiento por caída (cm)		MEYERHOF Capacidad de carga (KPa)		TERZAGUI Capacidad de carga (KPa ²)		MEYERHOF Capacidad de carga (KPa)	TERZAGUI Capacidad de carga (KPa)
	Caída 50 cm	Caída 70 cm	Caída 50 cm	Caída 70 cm	Caída 50 cm	Caída 70 cm	superficial	superficial
	16	7,3	9,5	25,39	33,28	31,21	40,62	24,12
17	6,5	8,8	23,19	31,64	28,59	38,71	24,81	25,27
18	5,4	6,7	21,28	26,51	27,53	34,16	28,94	30,12
32	8,2	10,7	28,60	37,64	35,06	45,75	24,12	24,56
34	7,6	10,6	27,22	38,35	33,43	46,62	24,81	25,27
36	6	7,7	23,69	30,57	30,59	39,26	28,94	30,12
48	8,5	9,8	29,68	34,37	36,34	41,90	24,12	24,56
51	7,2	8,1	25,75	29,06	31,67	35,63	24,81	25,27
55	6	7,4	23,69	29,35	30,59	37,73	28,94	30,12

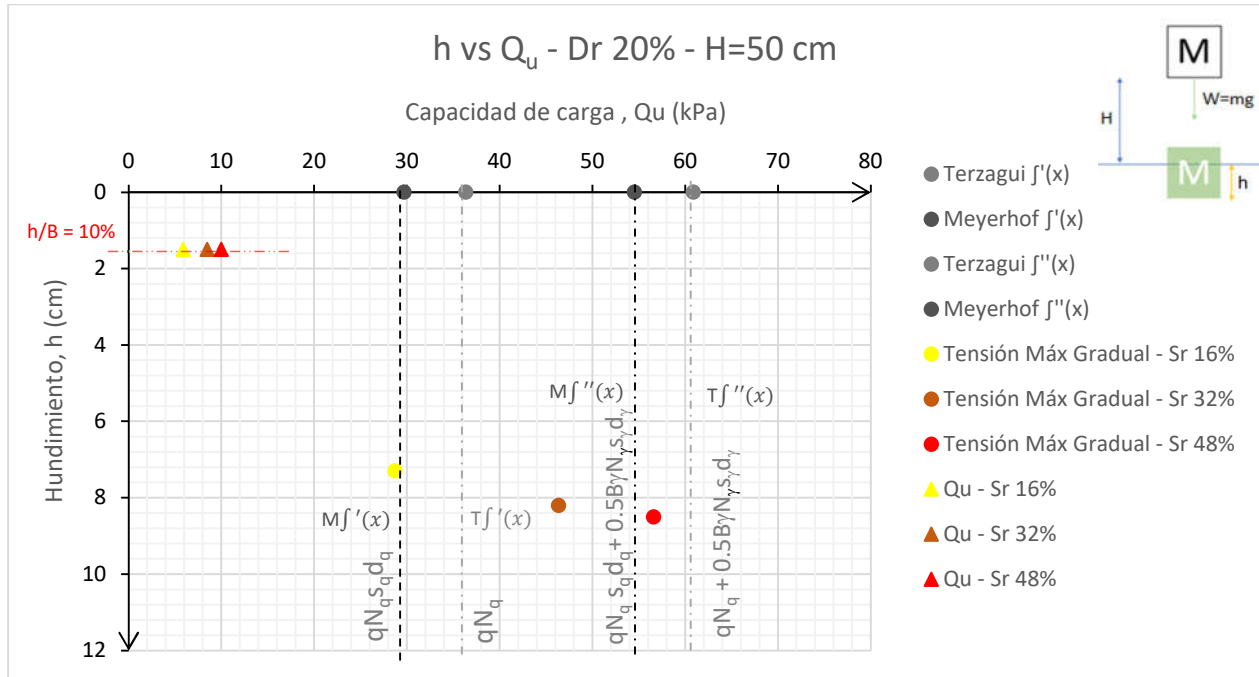
Tabla 4.22, Capacidad de carga última de (Trivedi, 2009) para hundimientos por caídas de 50 y 70 cm

S _r (%)	D _r (%)	Hundimiento, h para (cm)		Tensión (KPa)		Cantidad de veces que h/B=0,1 es sobre pasado por la Carga gradual máx.		Capacidad de carga última, Q _u (KPa)	
		Caída 50 cm	Caída 70 cm	Caída 50 cm	Caída 70 cm	Caída 50 cm	Caída 70 cm	Caída 50 cm	Caída 70 cm
16	20	7,3	9,5	28,73	48,09	4,87	6,33	5,90	7,59
17	30	6,5	8,8	23,28	39,37	4,33	5,87	5,37	6,71
18	40	5,4	6,7	27,86	39,37	3,60	4,47	7,74	8,81
32	20	8,2	10,7	46,35	56,59	5,47	7,13	8,48	7,93
34	30	7,6	10,6	41,99	56,59	5,07	7,07	8,29	8,01
36	40	6	7,7	33,27	41,99	4,00	5,13	8,32	8,18
48	20	8,5	9,8	56,59	61,13	5,67	6,53	9,99	9,36
51	30	7,2	8,1	39,37	54,46	4,80	5,40	8,20	10,08
55	40	6	7,4	34,84	39,37	4,00	4,93	8,71	7,98

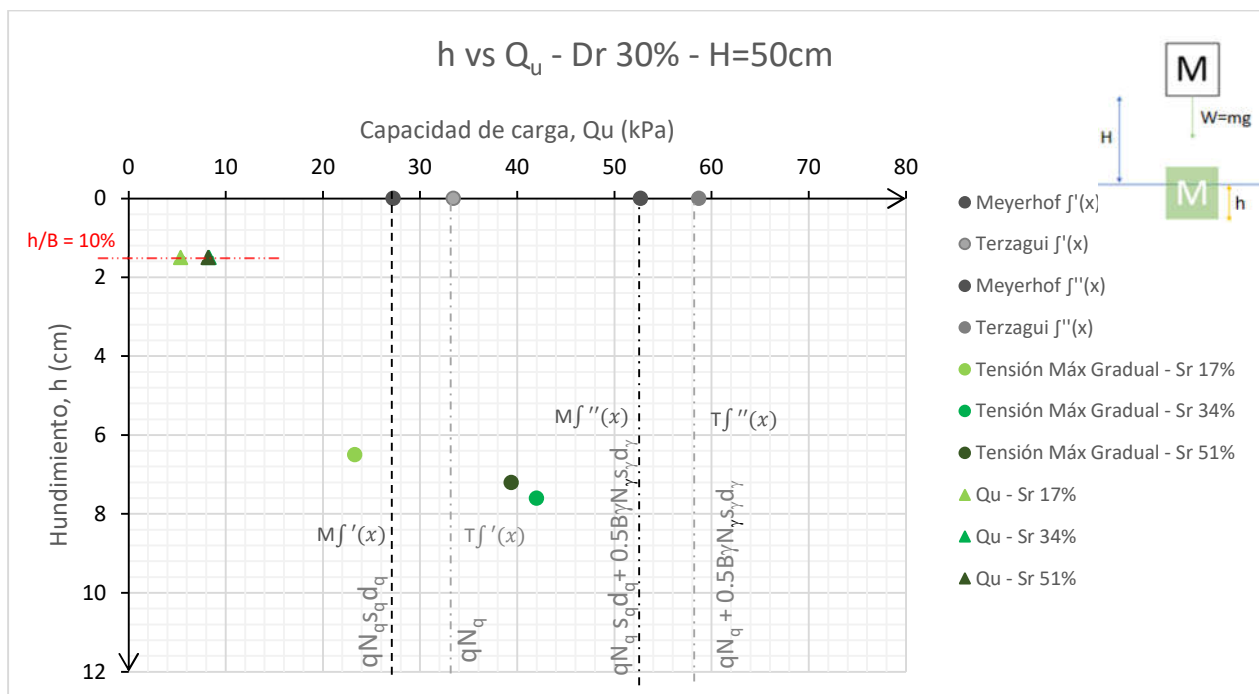
Al graficar los datos recopilados de la tablas anteriores y separando términos para obtener una mejor visualización, se entiende como Meyerhof $f'(x) = q_u = qN_q s_q d_q$ y Meyerhof $f''(x) = q_u = qN_q s_q d_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma s_\gamma d_\gamma$. En el caso de Terzagui $f'(x) = q_u = qN_q$ y

Terzagui $f''(x) = q_u = qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma s_\gamma$. Para representar a Trivedi, se ve los datos relacionados a $h/B = 10\%$ con una línea punteada roja.

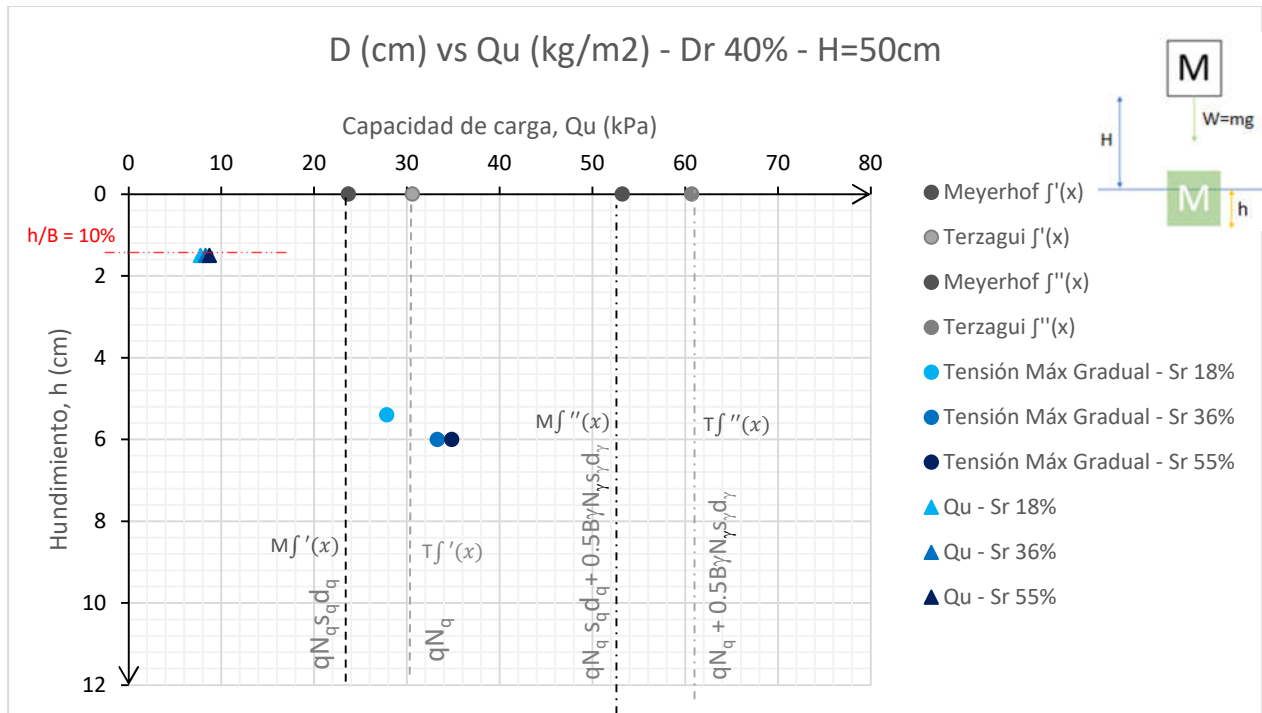
Gráfica 4.31, hundimiento versus capacidad de carga a una densidad relativa de 20% y una altura de caída de 50 cm



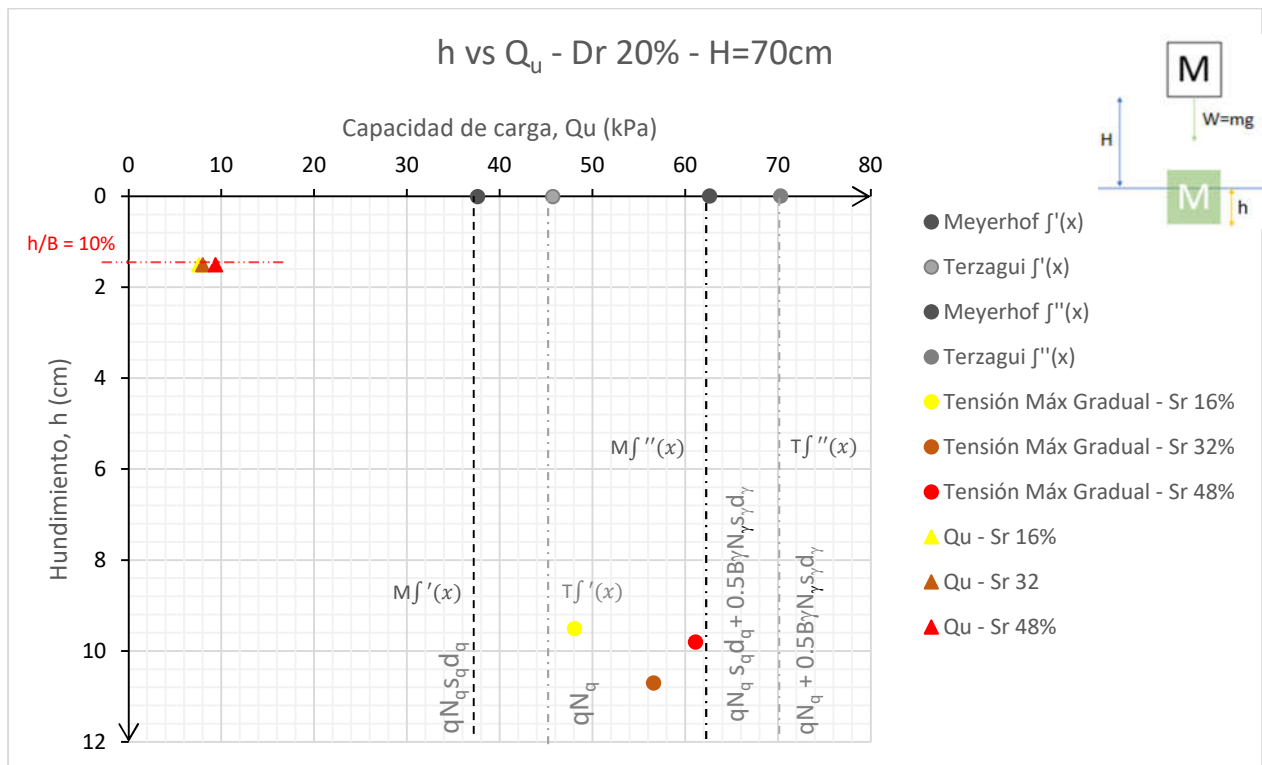
Gráfica 4.32, hundimiento versus capacidad de carga a una densidad relativa de 30% y una altura de caída de 50 cm



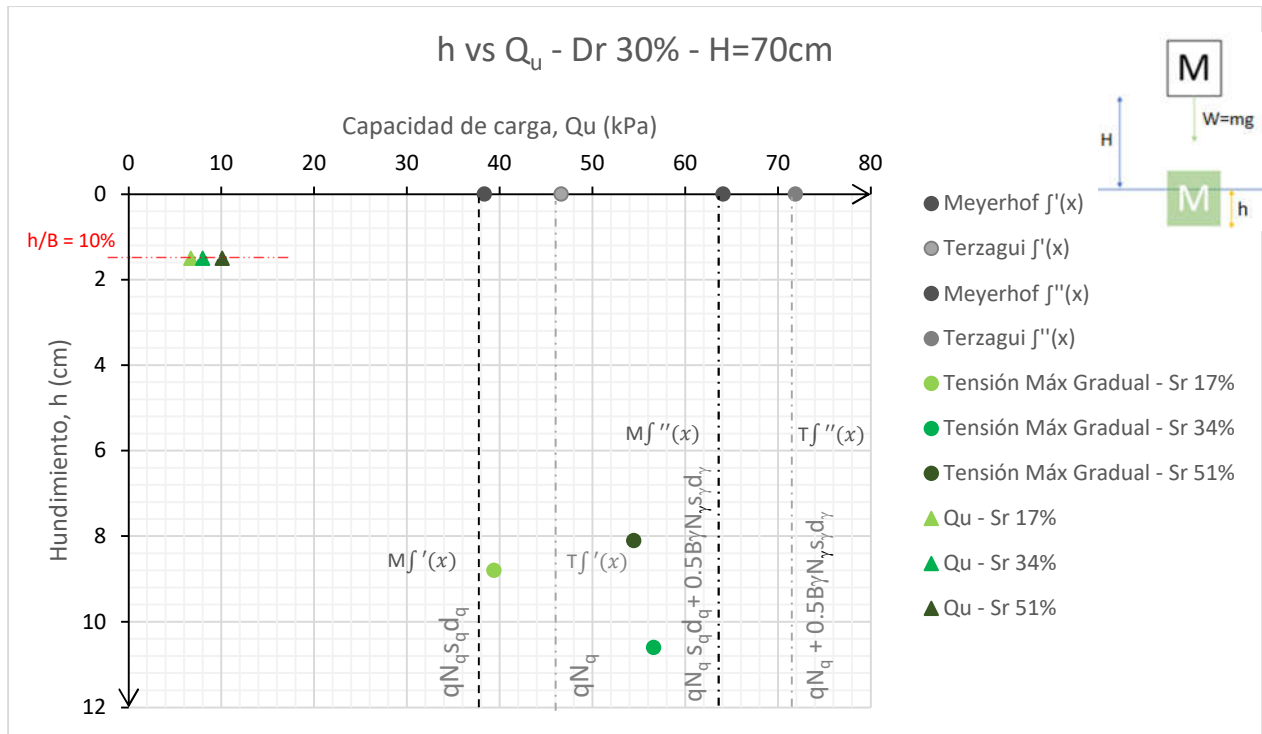
Gráfica 4.33, hundimiento versus capacidad de carga a una densidad relativa de 40% y una altura de caída de 50 cm



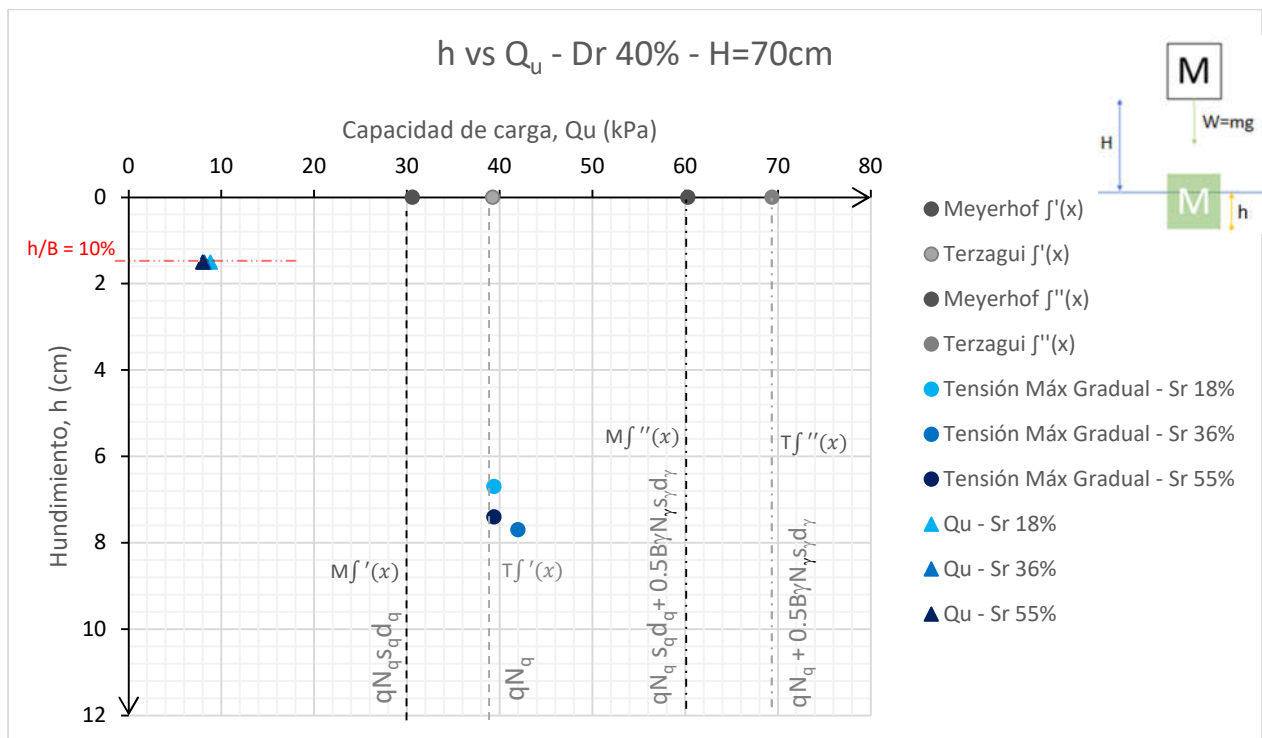
Gráfica 4.34, hundimiento versus capacidad de carga a una densidad relativa de 20% y una altura de caída de 70 cm



Gráfica 4.35, hundimiento versus capacidad de carga a una densidad relativa de 30% y una altura de caída de 70 cm



Gráfica 4.36, hundimiento versus capacidad de carga a una densidad relativa de 40% y una altura de caída de 70 cm

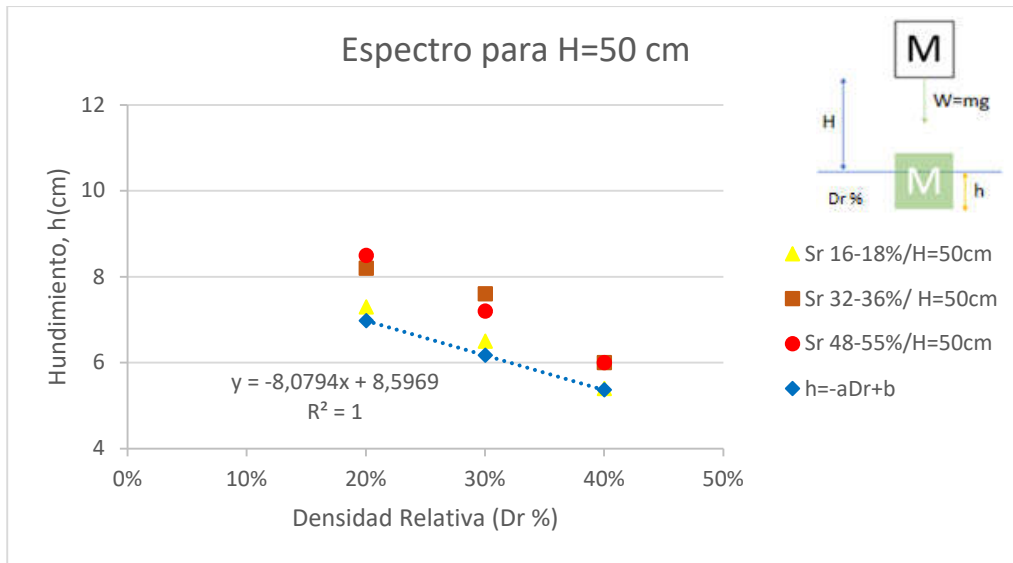


De las gráficas anteriores, se observa la teoría de Terzagui y la de Meyerhof no tuvieron un buen ajuste con respecto a la tensión última, estas teorías no convergieron a los resultados que se esperaban, debido a que estas metodologías no funcionan adecuadamente para materiales sueltos; por otro lado, existió un acercamiento a la tensión graduada máxima, puesto que se produjo una carga lenta hasta llegar al mismo nivel de hundimiento realizado por el impacto del bloque.

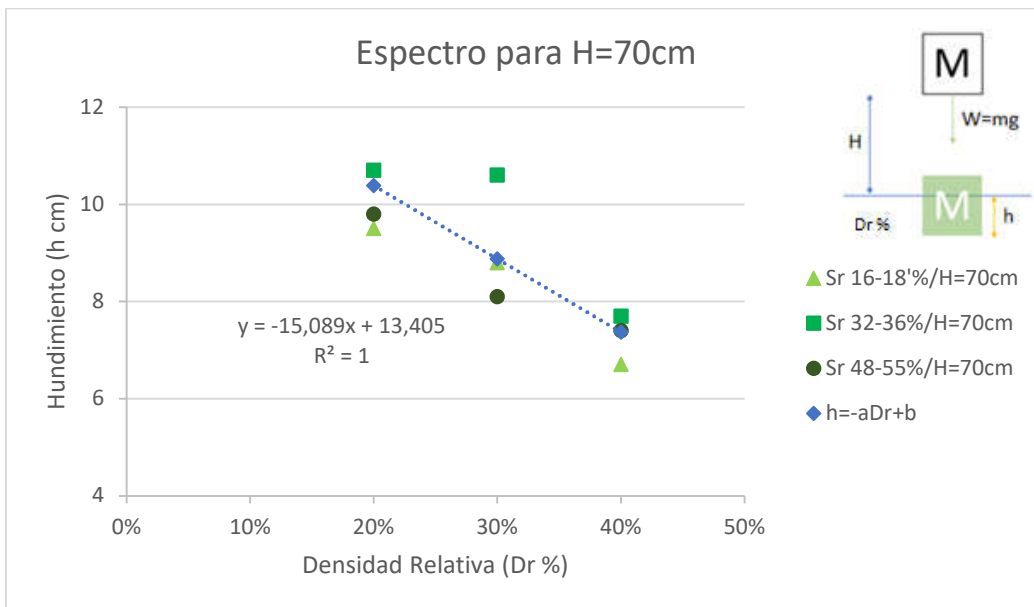
La tensión máxima gradual, representa la tensión donde se movilizó el suelo, es decir, donde ocurrió una falla al colocar una carga gradual sobre este; al comparar los valores anteriores con las teóricas de Meyerhof y Terzagui, se observó que, no se ajustan bien a los valores propuesto, los cuales deberían mostrar la capacidad de soporte justo antes de que falle el suelo. Usando la propuesta de (Trivedi, 2009), se aprecia que la arena falla al momento de que el bloque de concreto se asienta un 10% de su diámetro en el material; para este estudio fue considerado el ancho del área del bloque de concreto que corresponde a 15 cm, por ende el 10% de este valor sería 1,5 cm. Al realizar un cálculo proporcional (ver Tabla 4.22), se obtuvo cuanto era la tensión justo antes que fallará el suelo, la cual se representó con triángulos en las gráficas; con respecto a lo anterior se puede decir que los nuevos valores de tensión última si convergen a lo que se esperaría que ocurriera en terreno.

A partir de las tablas anteriores se construyeron las Gráfica 4.37 y Gráfica 4.38, las cuales reflejan la respuesta de hundimiento relacionado a la densidad relativa y separada por un rango de saturación, cada gráfica está separada por altura de caída.

Gráfica 4.37, Respuesta de hundimiento relacionada a la densidad relativa y separado por rango de saturación para altura de caída de 50 cm



Gráfica 4.38, Respuesta de hundimiento relacionada a la densidad relativa y separado por rango de saturación para altura de caída de 70 cm



Tomando en consideración las regresiones lineales de cada gráfica, se pudo obtener una ecuación general del tipo $h = - aDr+b$, la cual propone una línea de ajuste a los datos mostrados. Esta función general, relaciona la densidad relativa con el hundimiento ocasionado al dejar caer un bloque de concreto a una determinada altura, que para este caso fue de 50 y 70 cm; cabe destacar que puede ser utilizada para obtener la densidad

relativa de una arena, sabiendo el hundimiento que se provocó al dejar caer el bloque de concreto. Por otro lado, se destaca que también se deben replicar las condiciones de este estudio para poder obtener valores similares.

Con las gráficas anteriores y los valores mostrados en estas se construyó la Gráfica 4.39, la cual muestra la relación que existe entre el hundimiento, la capacidad de soporte última que se produce al dejar caer un bloque de concreto en una arena que tiene diferentes niveles de densidad relativa y saturación. Cabe destacar para el cálculo de capacidad de soporte última de una persona se consideró un peso de 85 kg, con un ancho de pie de 30 cm y un asentamiento de 5 cm al pisar la arena.

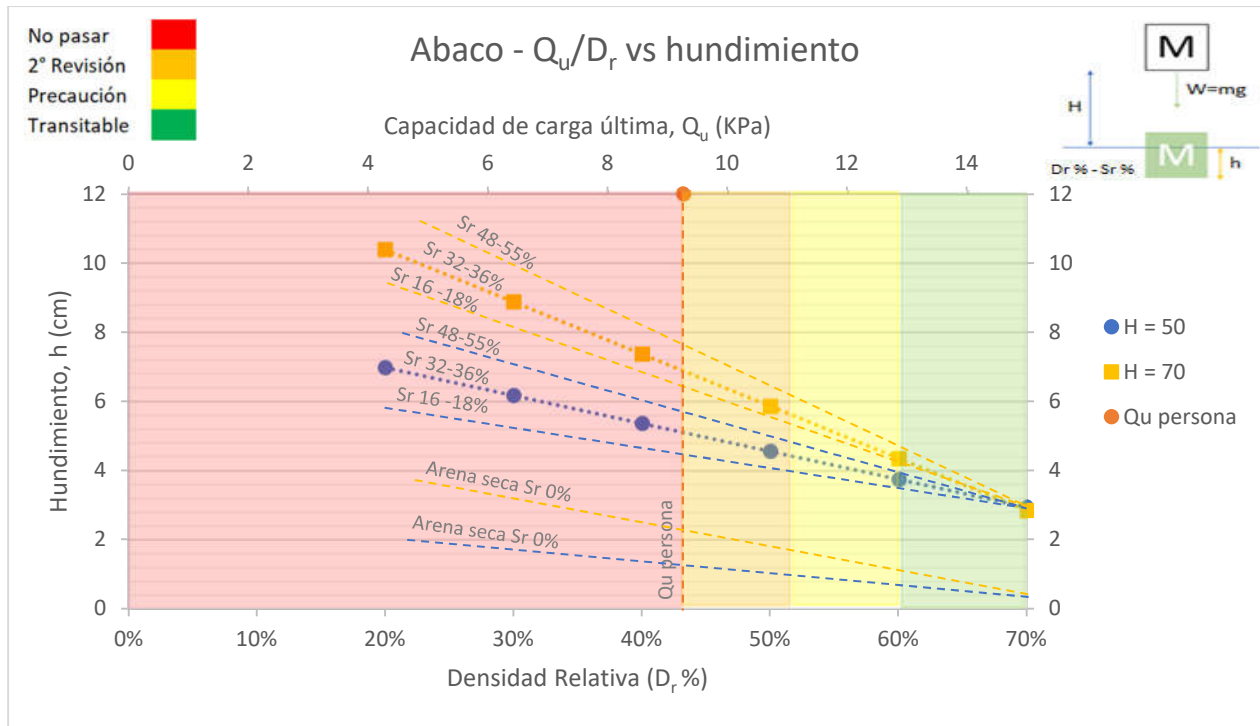
En el ábaco se ven cuatro zonas, delimitadas por colores distintos; el rojo indica un inminente peligro, no se recomienda transitar sobre la arena; el color anaranjado expresa que se requiere mayor información para evaluar si es seguro estar sobre la playa, se recomienda realizar una segunda prueba de hundimiento; el color amarillo indica que se puede transitar sobre la arena, pero se debe tener precaución ante cualquier anomalía imprevista; el color verde manifiesta que no existen riesgos asociados al tránsito sobre la arena, sin embargo siempre se deben tomar los resguardos necesarios y estar pendiente de como reacciona la playa al caminar en ella.

La capacidad última de una persona, se refleja en el ábaco por una línea punteada de color anaranjado; a la izquierda de esta línea, se considera una zona no transitable y hacia el lado derecho, es una zona donde se puede caminar, pero siempre con precaución y manteniendo los resguardos necesarios.

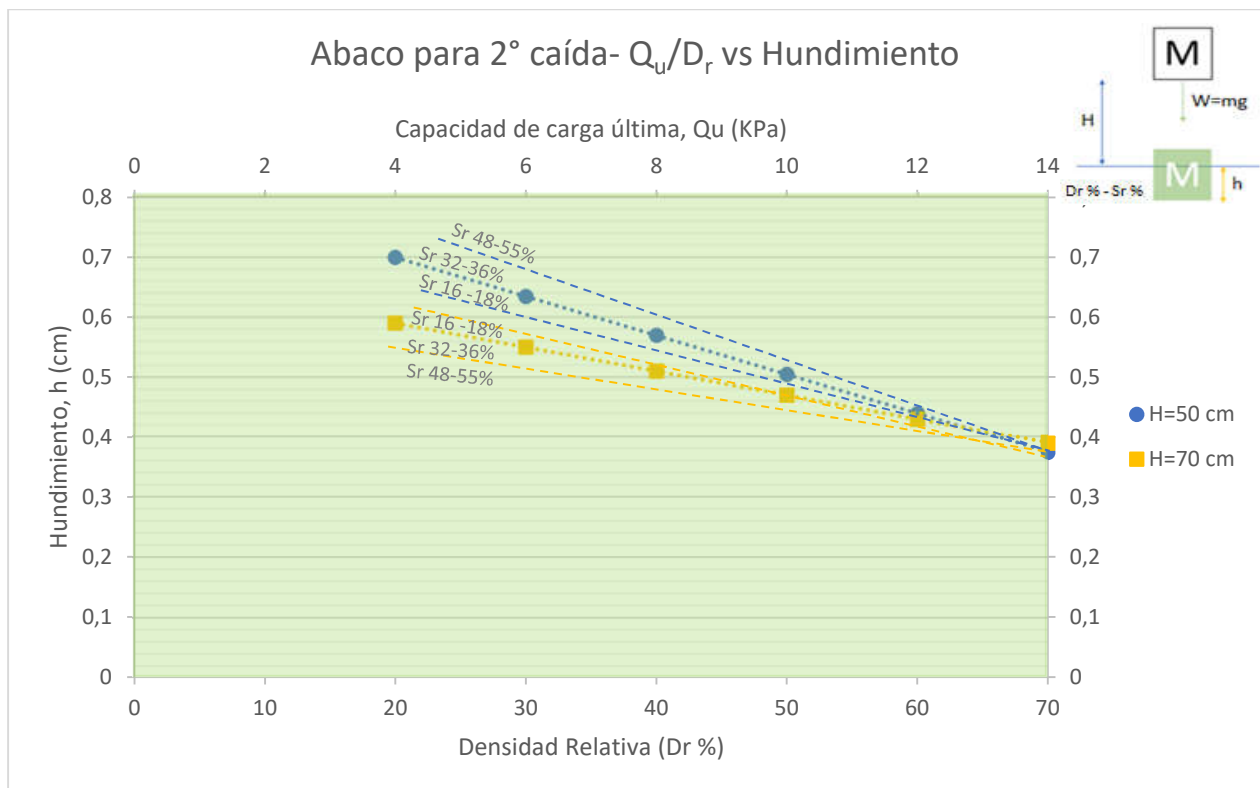
Para tener una respuesta certera, se deben mantener las condiciones del estudio, es decir, dejar caer un bloque de cemento con las mismas características del experimento y a alturas de 50 o 70 cm, según se requiera. También considerar la posible saturación y densidad relativa de la arena al momento de analizar un valor de hundimiento.

La Gráfica 4.40 muestra la respuesta de hundimiento al dejar caer el bloque de concreto sobre la arena, la cual es considerablemente menor a la respuesta por primera caída.

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



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



5. CONCLUSIÓN

Los depósitos de relaves en Chile son una parte fundamental dentro de un yacimiento minero, ya que reciben todos los desechos que se generan en el proceso de flotación, en consecuencia, se encuentran siempre en constante crecimiento. La sedimentación de los relaves provoca que se formen playas dentro del depósito, donde en ocasiones se transita para inspeccionar o realizar trabajos; cualquier actividad sobre una playa de relave es riesgosa si no se sabe el estado en que se encuentra. Por consiguiente, el estudio se basó en desarrollar una metodología práctica que estimara la capacidad de soporte in situ de arenas sueltas parcialmente saturada, para cumplir con el objetivo propuesto se realizaron una serie de procesos; En primera instancia se desarrolló una metodología analítica para determinar la capacidad de soporte en arenas, que sirvió de base para realizar los ensayos de hundimiento en arenas que poseían diferentes densidades relativas (30, 50, 70 y 80%), que consistieron en dejar caer un bloque de concreto a alturas de 50, 70 y 100 cm desde una superficie plana de arena para registrar cuanto era el hundimiento. Posteriormente, se buscó una relación entre los hundimientos de caída registrados, para 50-70 cm y la capacidad de soporte desarrollada por el material, donde se aplicó una carga gradual para replicar el impacto ocasionado en la arena por el bloque de concreto.

En la última etapa del experimento, se compararon los resultados obtenidos y se evaluó una metodología para determinar de capacidad de soporte en el material ensayado; el estudio utilizó arenas con poca presencia de finos, que tienden a fallar por punzonamiento; a causa del tipo de material que se usó, las capacidades de soporte calculadas con los métodos de Terzagui y Meyerhof no se acercan al valor de tensión última, a través de lo propuesto por Trivedi; los métodos clásicos convergen solo cuando se realiza una carga lenta sobre la arena y se lleva a un nivel en donde falle. Cabe destacar que, la capacidad de carga última no se puede representar a través de la teoría de Terzagui y Meyerhof, pero si se observan cargas de plastificación importantes del material provocadas por impactos, es decir, las metodologías no entregaron información sobre la capacidad de soporte última, pero se logra diferenciar la capacidad de soporte, ocasionada por el impacto, cuando se requiere llegar a un nivel de deformación mayor.

A partir de los resultados y el análisis de estos, se construyó un ábaco el cual indica la carga por impacto que se genera al dejar caer un bloque de concreto desde una altura de 50 y 70 cm, junto con la densidad relativa y grado de saturación que presenta el suelo.

Finalmente, a pesar de ejecutar el estudio fuera del laboratorio de la universidad, debido contingencia mundial, se logró el objetivo; realizar una metodología para medir in situ la capacidad de soporte en arenas sueltas que se encuentran parcialmente saturadas. En consecuencia, una persona puede conocer el orden de magnitud de tensión de soporte que desarrollará un suelo, a través de la relación entre el hundimiento por impacto y la energía empleada para generar dicha deformación.

RECOMENDACIONES

A continuación, se muestran recomendaciones para aumentar la certeza al aplicar la metodología in situ, también se hacen sugerencias para nuevas líneas investigativas asociadas al estudio:

- Al utilizar el ábaco, se deben replicar las mismas alturas de caída del estudio y utilizar un bloque de concreto con características similares, para obtener una respuesta que se ajuste a este.
- Replicar la caída del bloque de concreto en una playa de relave y analizar cómo se ajusta el ábaco.
- Replicar el mismo estudio con arenas de relave y realizar un ábaco con respecto a ese estudio.
- Comparar ambos ábacos, el realizado en este estudio y el hecho con el de arena de relave.

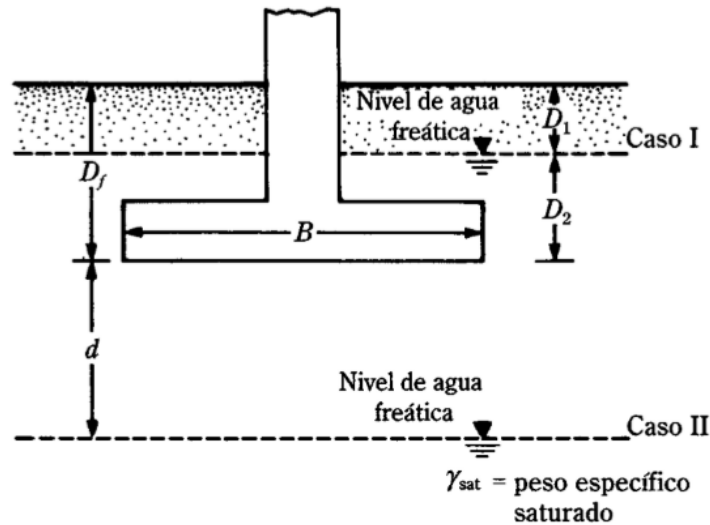
REFERENCIAS

1. Araya, V., Suazo, G., Villavicencio, G., & Silva, M. (2019). Monitoreo de la humedad en depósitos de relave a partir de mediciones de reflexión de luz. En *Obras y Proyectos* (págs. 25, 35-41).
2. Braja M. Das. (1999). Cimentaciones superficiales: Capacidad de carga última. En *Principios de ingeniería de cimentaciones cuarta edición* (págs. 152-217). Sacramento: International Thomson Editores.
3. Braja M. Das. (1999). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Cengage Learning.
4. Comisión Chilena del Cobre. (2020). *Cochilco*. Obtenido de <http://www.cochilco.cl:4040/boletin-web/pages/tabla16/buscar.jsf>
5. Decreto Supremo N° 248. (2007). Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos De Relaves. Ministerio de Minería.
6. Desconcierto. (23 de Junio de 2015). *El Desconcierto*. Obtenido de <https://www.eldesconcierto.cl/2015/06/23/relaves-mineros-los-deshechos-toxicos-de-la-gran-industria-que-amenazan-con-sepultarnos/>
7. Falcón, M. F., & Ramirez, P. (2015). *Servicio Nacional de Geología y Minería*. Obtenido de https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/DataFiles/14127_pp_863_865.pdf
8. Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (2004). Características de conjuntos de partículas. En I. t. Massachusetts, *Mecánica de suelos* (pág. 43). Mexico, D. F.: Limusa S.A.
9. Layfield. (2020). *Layfield environmental containment*. Obtenido de <https://www.layfieldgroup.com/Environmental-Containment/About-Us/Construction-Services.aspx>
10. Lukas, R. G. (March, 1995). *Geotechnical Engineering Circular No. 1 DYNAMIC COMPACTION*. Washington, DC 20590: Office of Technology Applications.
11. McKenna, G. (17 de mayo de 2014). *Flickr*. Obtenido de <https://www.flickr.com/photos/gord99/albums/72157648872471455/with/7666792324/>
12. Minería Chilena. (5 de mayo de 2015). *Minería Chilena, información confiable y oportuna*. Obtenido de <https://www.mch.cl/reportajes/relaves-de-alto-espesamiento-desafios-en-el-diseno-del-sistema-de-transporte/>
13. Ministerio de minería, G. d. (09 de 03 de 2020). *Minminería*. Obtenido de <http://www.minminería.gob.cl/glosario-minero-r/relave/>

-
14. NCh1726. (1980). *Mecánica de suelos - Determinación de las densidades máxima y mínima y cálculo de la densidad relativa en suelos no cohesivos*. Norma chilena oficial.
 15. Ramos, W., Galarza, C., & A. De Amat. (2006). Queratosis arsenical en pobladores expuestos a relaves mineros en altura en San Mateo de Huanchor: ¿Sinergismo entre arsenicismo y daño actínico crónico? *Dermatología Peruana*, 41-54.
 16. Red de Sismología Nacional de Costa Rica. (3 de agosto de 2014). *RSN, Costa Rica*. Obtenido de <https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/geologia/571-licuacion-de-suelos-durante-terremotos>
 17. *Resumen*. (3 de febrero de 2019). Obtenido de <https://resumen.cl/articulos/grandesastre-tranque-relave-el-cobre-dejo-cientos-muertos-chile>
 18. Sernageomin. (2007). *Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves*. Morandé, Nelson A. Ramírez.
 19. Sernageomin. (2020). *Sernageomin*. Obtenido de <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-relaves.php>
 20. Servicio Nacional de Geología y Minería. (2018). *Sernageomin*. Obtenido de <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/Preguntas-frecuentes-sobre-relaves.pdf>
 21. Servicio Nacional de Geología y Minería. (2019). *Sernageomin*. Obtenido de <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>
 22. Sezer, A., Altun, S., & Göktepe, B. a. (octubre de 2011). Relationships between shape characteristics and shear strength of sand. En J. g. society, *Soild and foundations Vol. 51, No 5* (págs. 857-871).
 23. Simoni, A., & Houlsby, G. (2004). *The direct shear strength and dilatancy of sand-gravel mixtures*. Bologna, Italy: Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali, Università di Bologna.
 24. Terzagui, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, INC.
 25. Trivedi, A. (Enero de 2009). *Researchgate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/232723376_Bearing_Capacity_and_Settlement_of_Footing_Resting_on_Confined_Loose_Silty_Sands
 26. Vesic, A. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. J. S. M. F. D., Vol. 99, SM1.
 27. Vick, S. G. (1983). *Planning, design, and analysis of tailings dams*. John Wiley & Sons.

ANEXOS

Anexo 1, modificación de las ecuaciones de capacidad de carga por nivel de aguas freáticas



FUENTE: (Braja M. Das, Cimentaciones superficiales: Capacidad de carga última, 1999)

Anexo 2, tablas con factores de capacidad de carga de Terzagui y Meyerhof

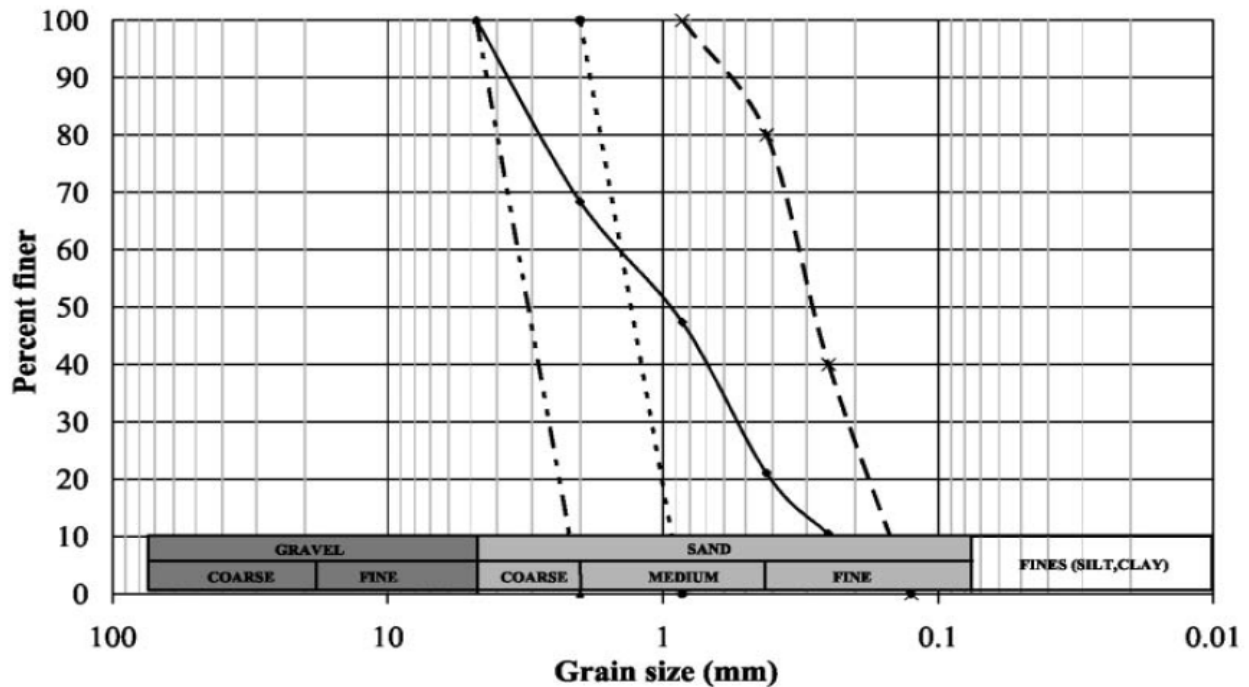
Tabla factores de capacidad de carga según las ecuaciones de Terzaghi. [Ver Terzaghi (1943), p. 127]

ϕ , deg	N_c	N_q	N_γ	K_{py}
0	5.7*	1.0	0.0	10.8
5	7.3	1.6	0.5	12.2
10	9.6	2.7	1.2	14.7
15	12.9	4.4	2.5	18.6
20	17.7	7.4	5.0	25.0
25	25.1	12.7	9.7	35.0
30	37.2	22.5	19.7	52.0
34	52.6	36.5	36.0	
35	57.8	41.4	42.4	82.0
40	95.7	81.3	100.4	141.0
45	172.3	173.3	297.5	298.0
48	258.3	287.9	780.1	
50	347.5	415.1	1153.2	800.0

Tabla factores de capacidad de carga según las ecuaciones de Meyerhof, Hansen y Vesic. (Meyerhof 1951, 1963)

ϕ	N_c	N_q	$N_{\gamma(H)}$	$N_{\gamma(M)}$	$N_{\gamma(V)}$	N_q/N_c	$2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2$
0	5.14*	1.0	0.0	0.0	0.0	0.195	0.000
5	6.49	1.6	0.1	0.1	0.4	0.242	0.146
10	8.34	2.5	0.4	0.4	1.2	0.296	0.241
15	10.97	3.9	1.2	1.1	2.6	0.359	0.294
20	14.83	6.4	2.9	2.9	5.4	0.431	0.315
25	20.71	10.7	6.8	6.8	10.9	0.514	0.311
26	22.25	11.8	7.9	8.0	12.5	0.533	0.308
28	25.79	14.7	10.9	11.2	16.7	0.570	0.299
30	30.13	18.4	15.1	15.7	22.4	0.610	0.289
32	35.47	23.2	20.8	22.0	30.2	0.653	0.276
34	42.14	29.4	28.7	31.1	41.0	0.698	0.262
36	50.55	37.7	40.0	44.4	56.2	0.746	0.247
38	61.31	48.9	56.1	64.0	77.9	0.797	0.231
40	75.25	64.1	79.4	93.6	109.3	0.852	0.214
45	133.73	134.7	200.5	262.3	271.3	1.007	0.172
50	266.50	318.5	567.4	871.7	761.3	1.195	0.131

Anexo 3, Tamaño distribución arenas



FUENTE: (Sezer, Altun, & Göktepe, 2011)

Anexo 4, instrumentos utilizados en los ensayos

- Molde cilíndrico
- Guincha
- Balanza
- Regla metálica
- Brocha
- Set de tamices
- Taladro
- Sobrecarga
- Pala pequeña
- Bloque de concreto



Anexo 5, Procedimiento para medir el volumen del molde

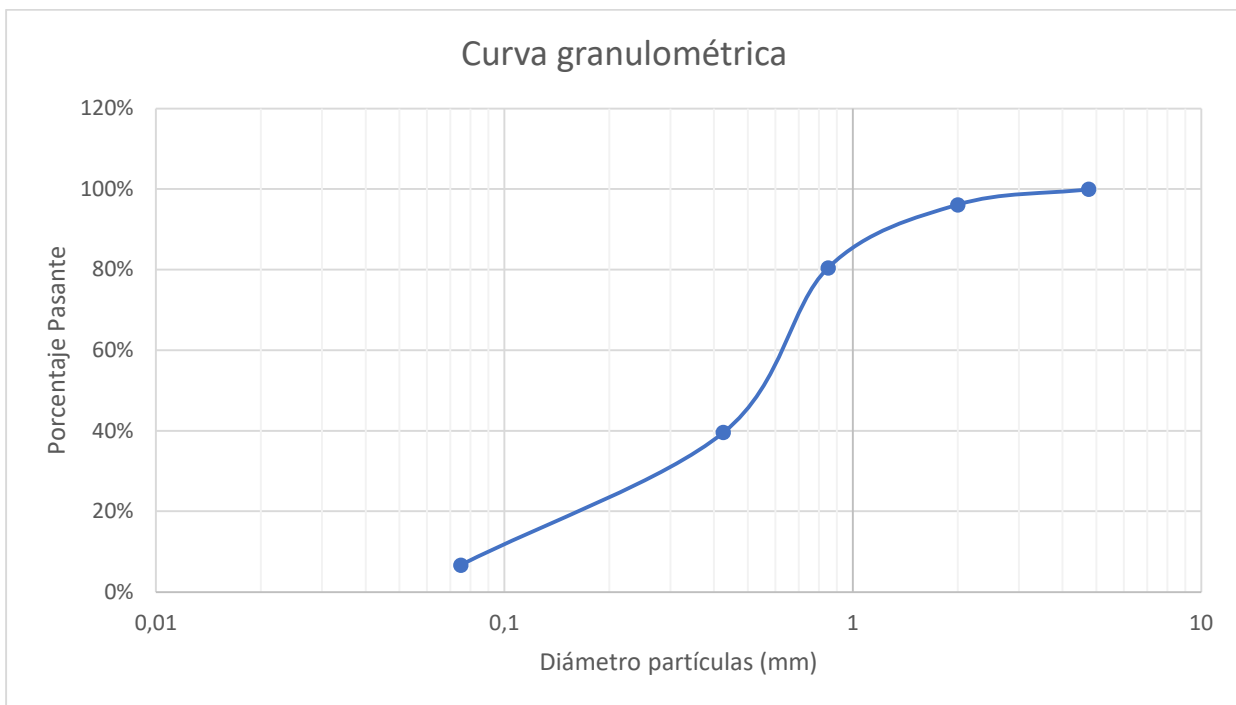


Anexo 6, Procedimiento de tamizado arena

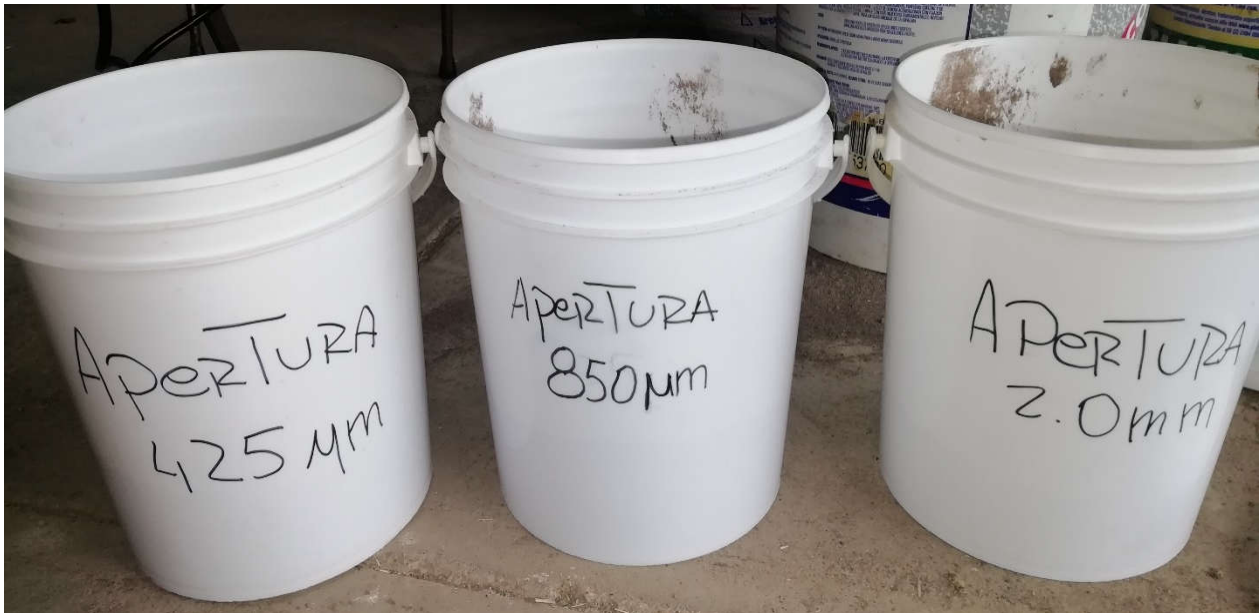


Anexo 7, granulometría de la arena

Denominación	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% pasante
4	4,75	0	0	0	100%
10	2	19	4%	4%	96%
20	0,85	77	16%	20%	80%
40	0,425	201	41%	60%	40%
200	0,075	162	33%	93%	7%
Base		33	7%	100%	
Sumatoria		492	100%		



Anexo 8, arena separada por tamaño



Anexo 9, secado de arena selecciona (tamaño 2mm)



Anexo 10, Procedimiento densidad mínima



Anexo 11, procedimiento densidad máxima.





Anexo 12, ensayo de hundimiento



Anexo 13, ensayo de hundimiento con humedad de 5%





Anexo 14, muestras recolectadas para densidad mínima

Densidad Mínima

	Molde + arena [g]	Masa arena [g]
Muestra 1	1046	999
Muestra 2	1035	988
Muestra 3	1033	986
Muestra 4	1034	987
Muestra 5	1019	972
Muestra 6	1028	981
Muestra 7	1033	986
Muestra 8	1033	986
PROMEDIO	1032,63	985,63

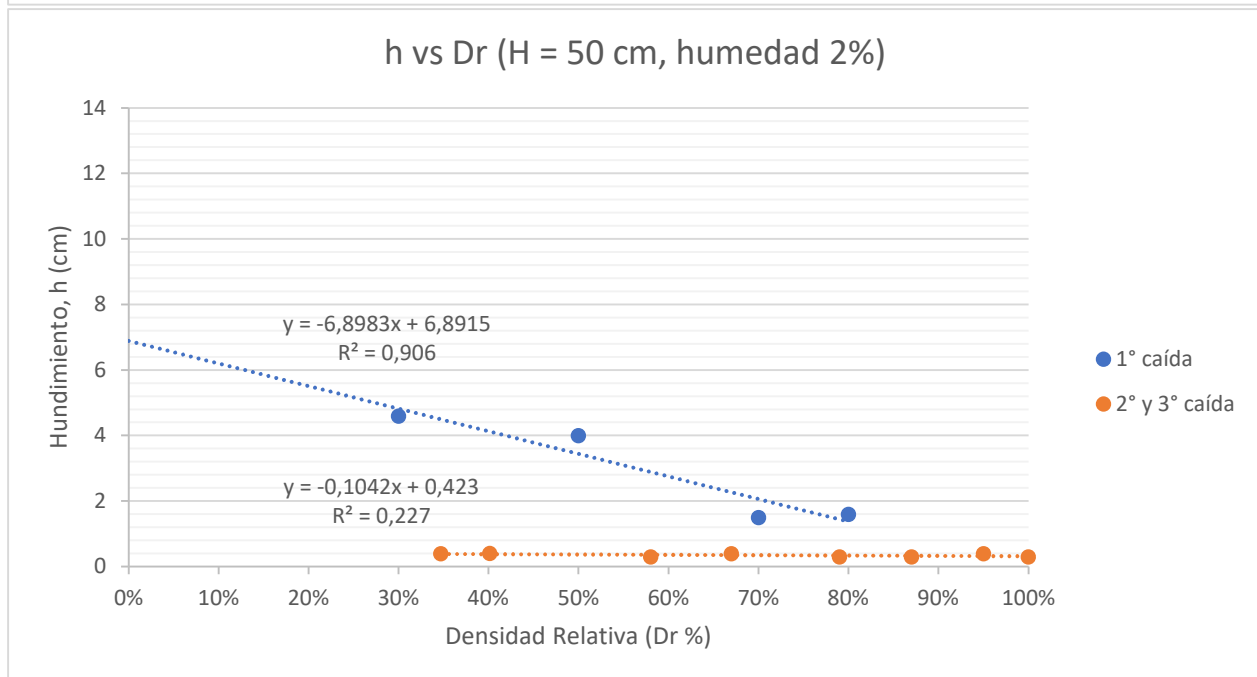
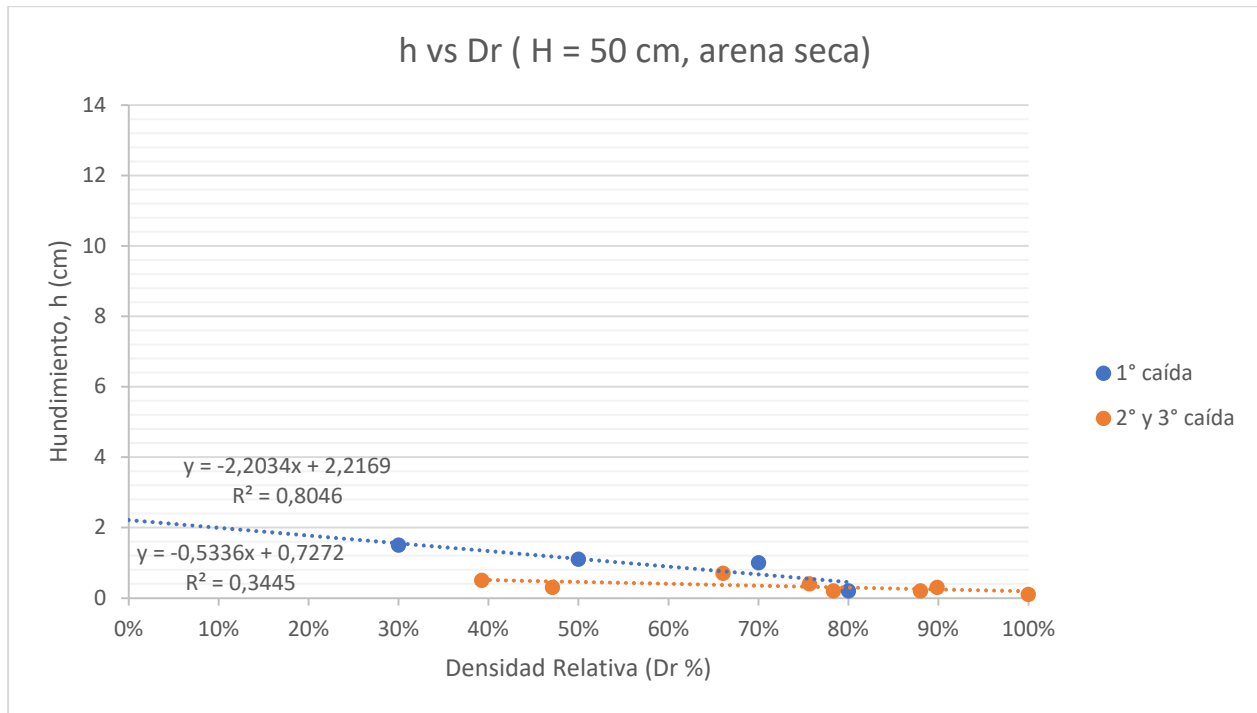
Anexo 15, muestras recolectadas para densidad máxima

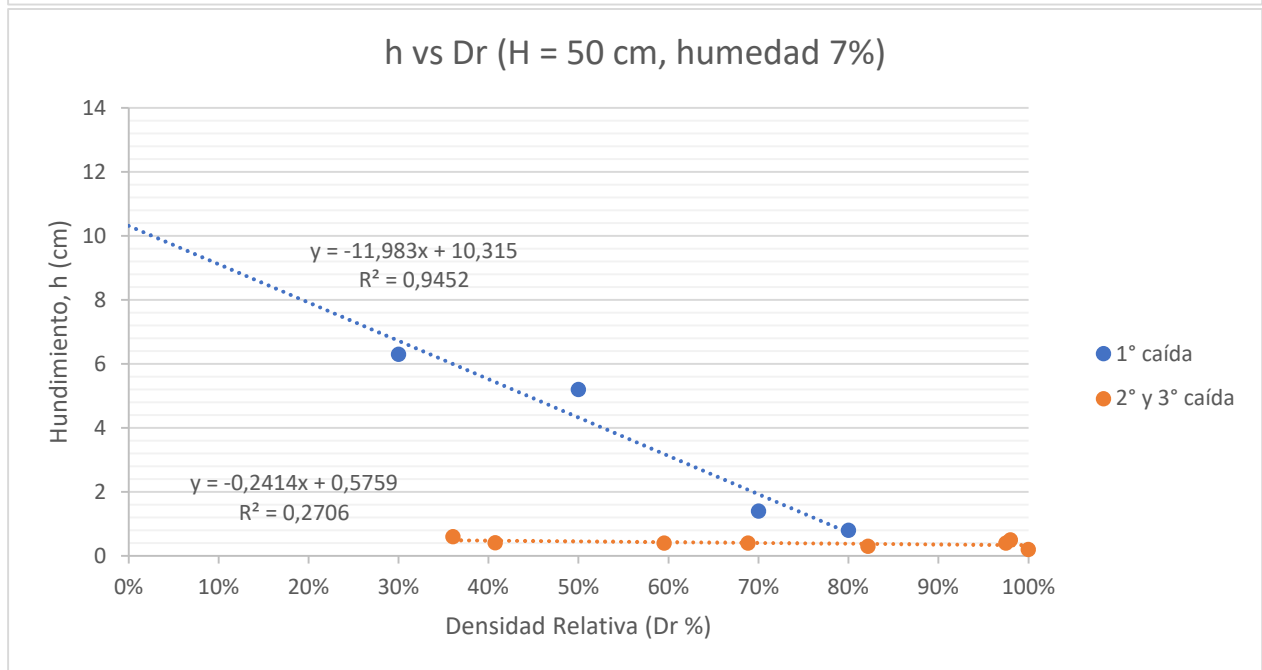
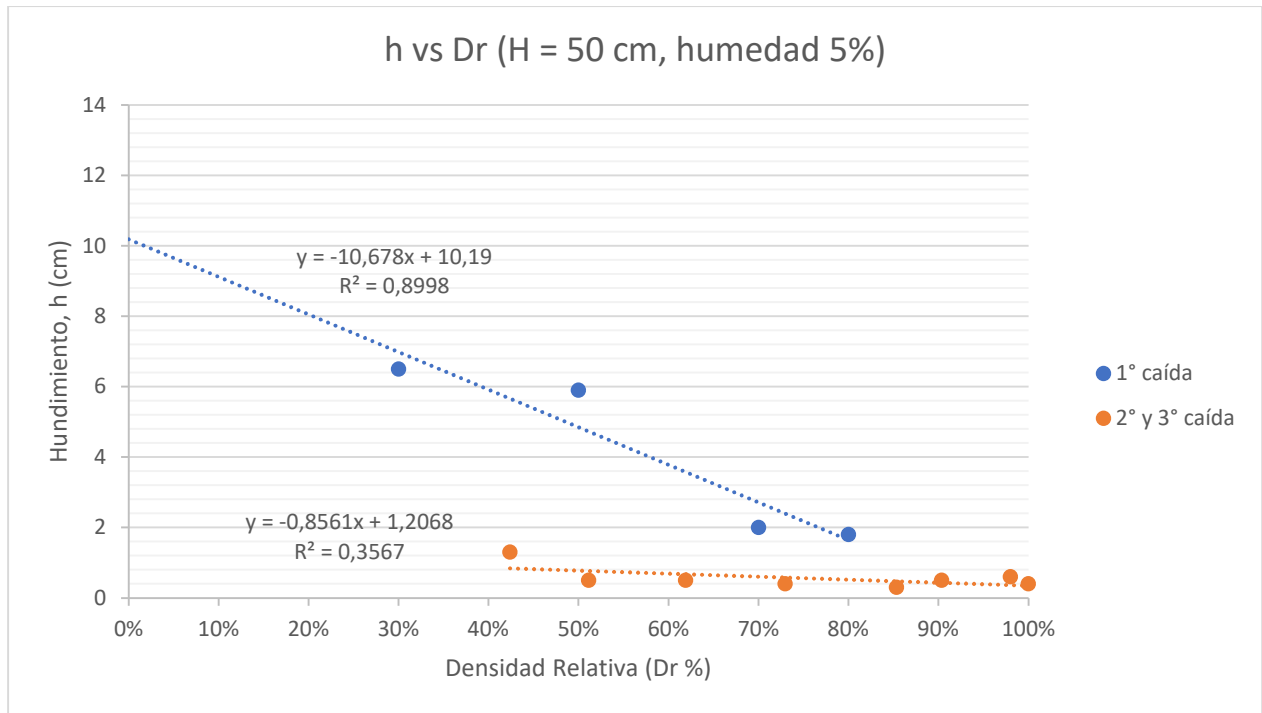
Densidad Máxima

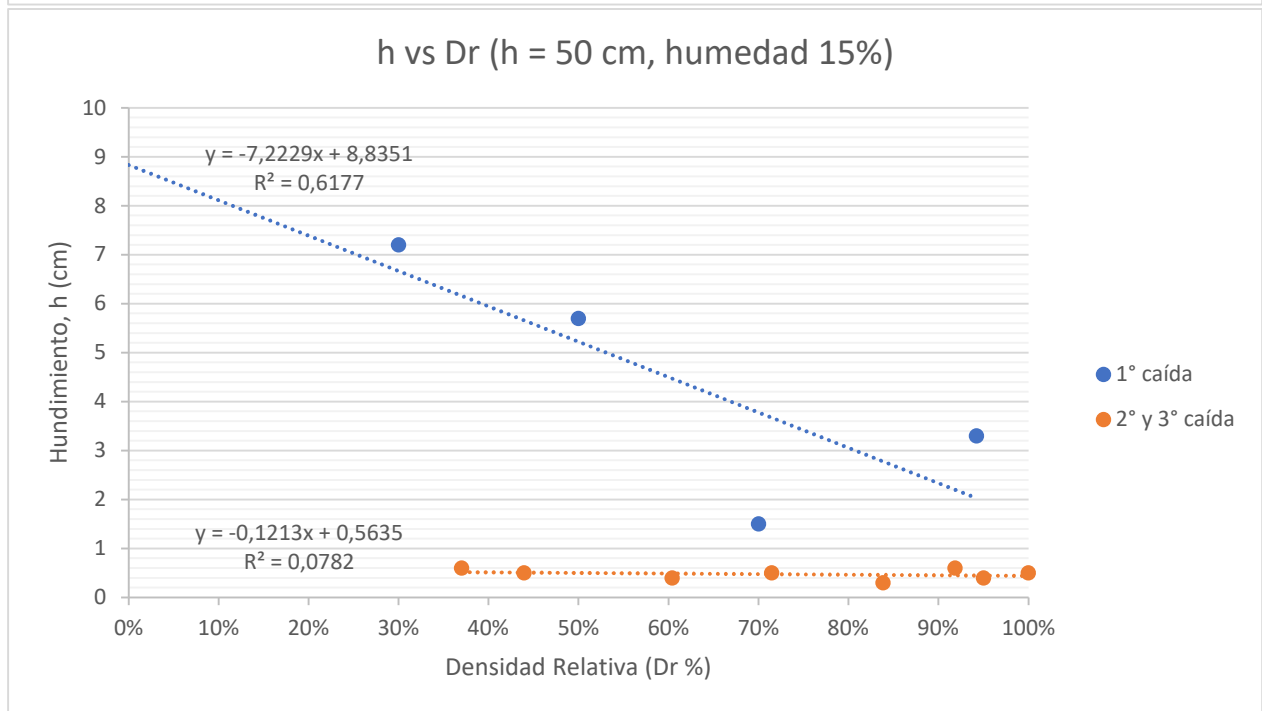
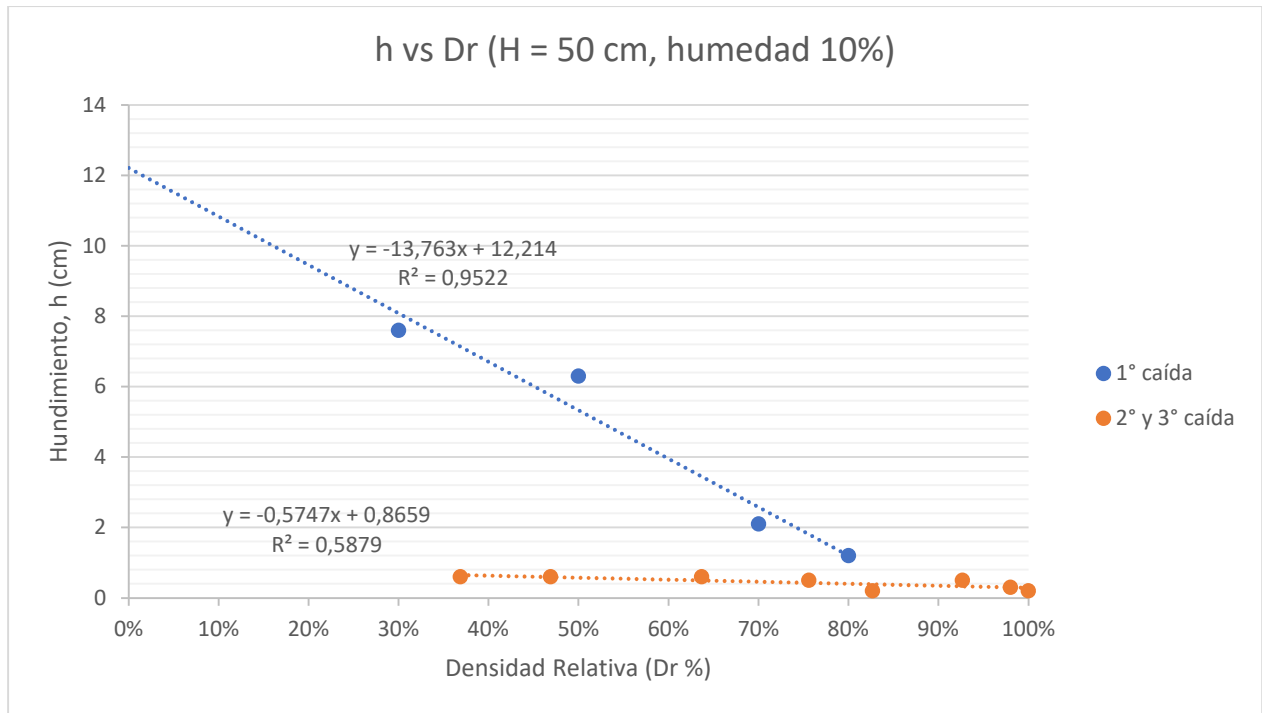
	Molde + arena [g]	Masa arena [g]	Largo inicial (mm)	Largo final (mm)
Muestra 1	1089	1042	135	117
Muestra 2	1080	1033	135	115
Muestra 3	1085	1038	135	120
Muestra 4	1090	1043	135	118
Muestra 5	1082	1035	135	117
Muestra 6	1083	1036	135	119
Muestra 7	1089	1042	135	115

Muestra 8	1088	1041	135	116
PROMEDIO	1085,75	1038,75	135	117,13

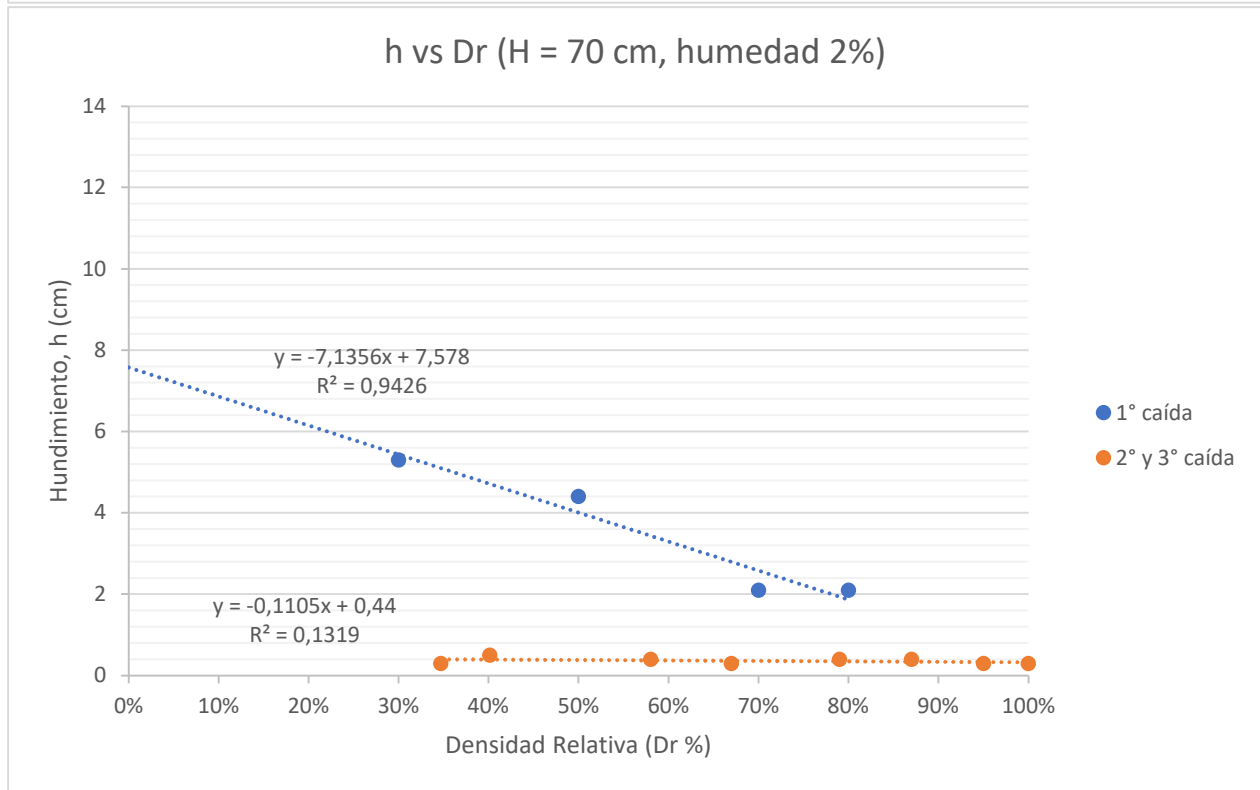
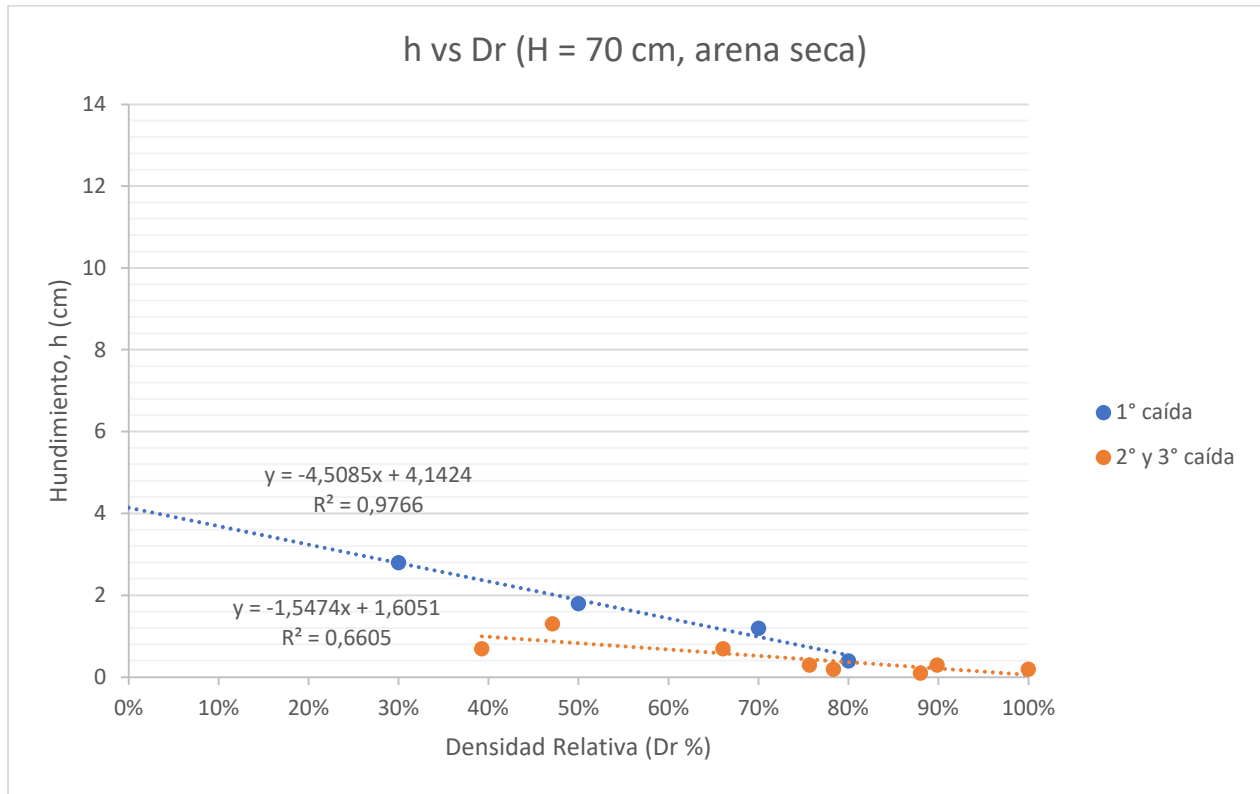
Anexo 16, hundimiento versus densidad relativa para caída de 50 cm a diferentes humedades de arena

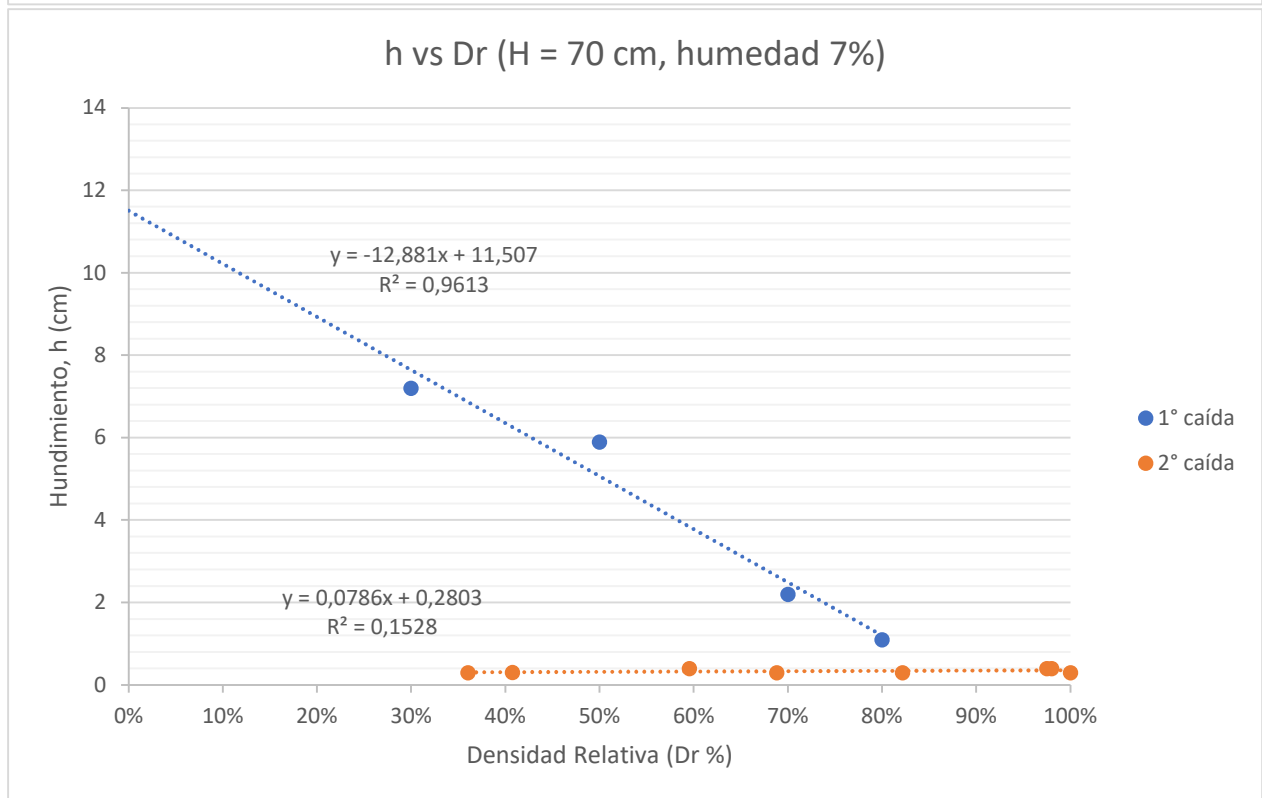
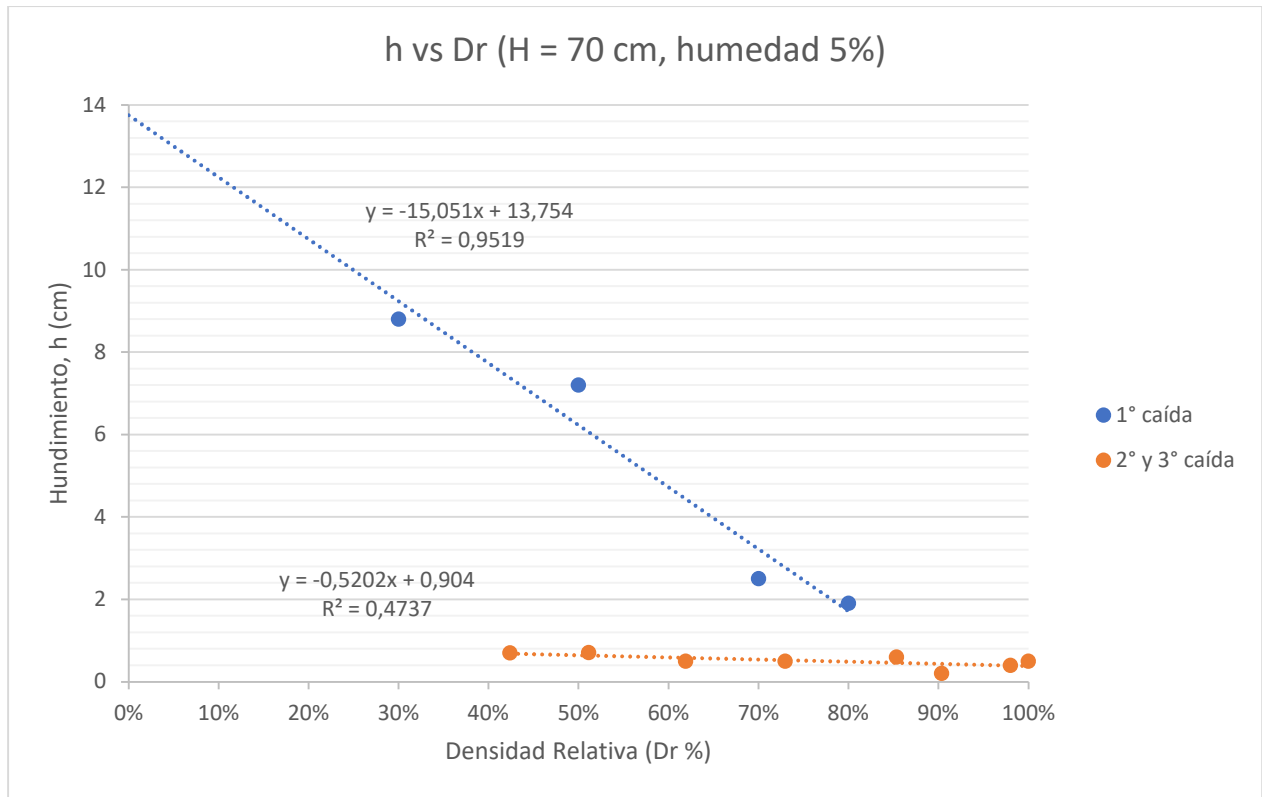


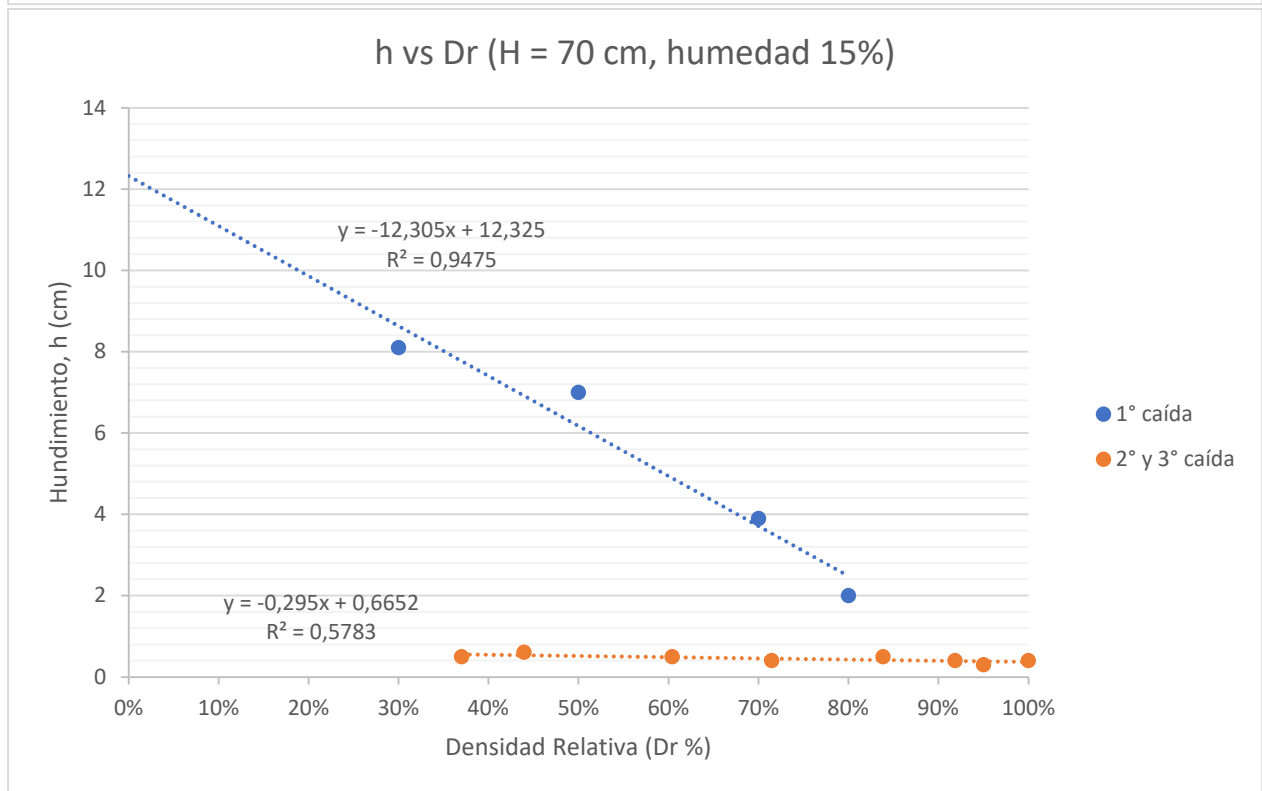
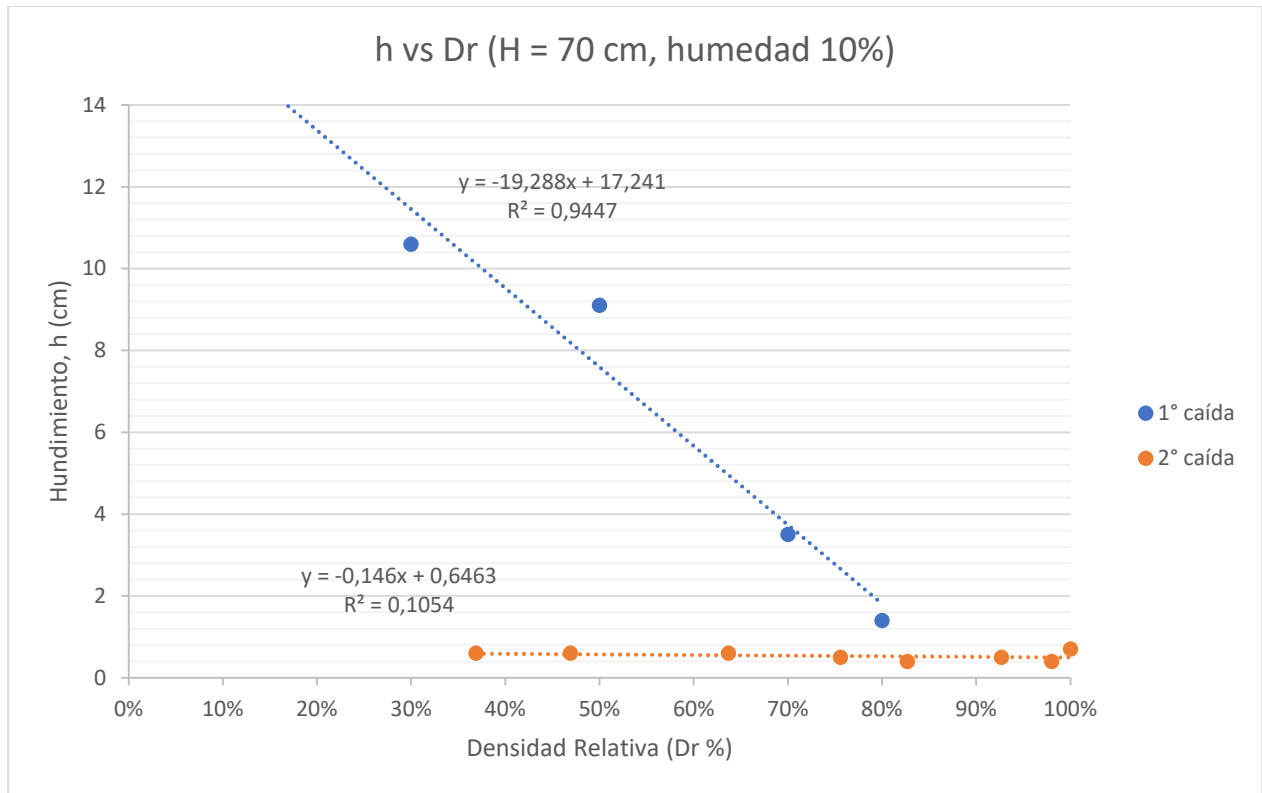




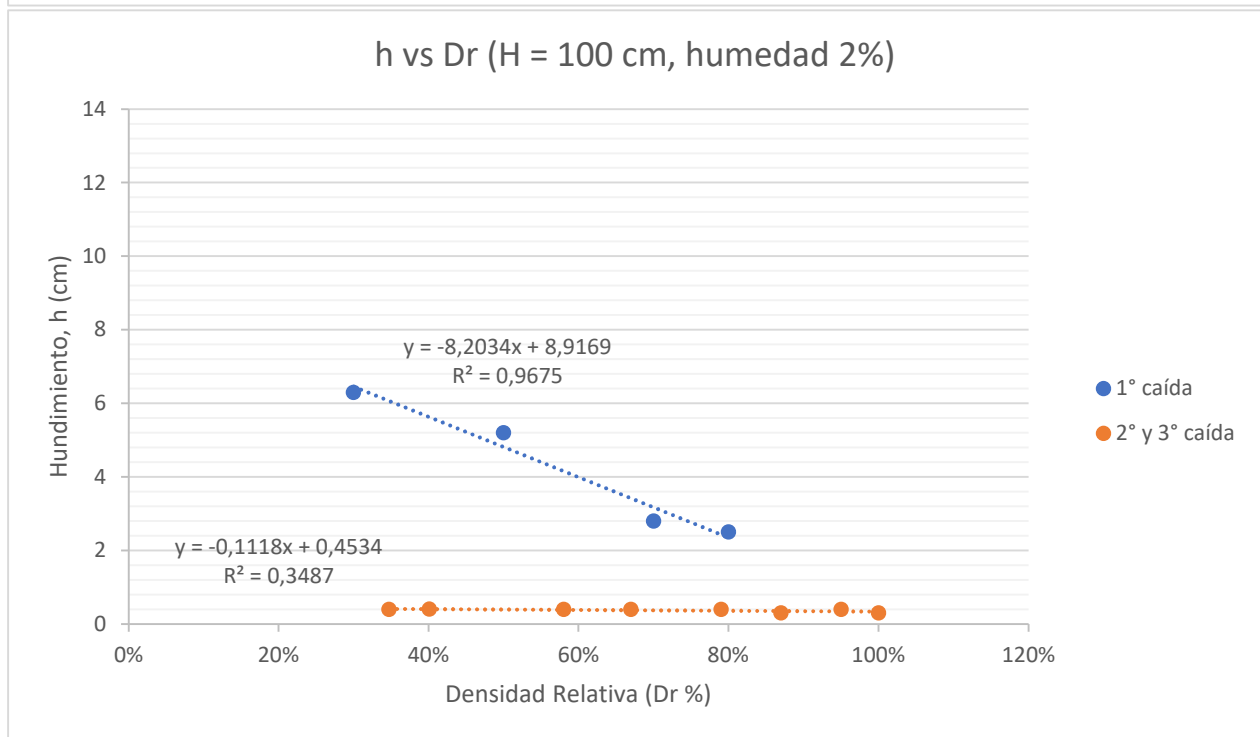
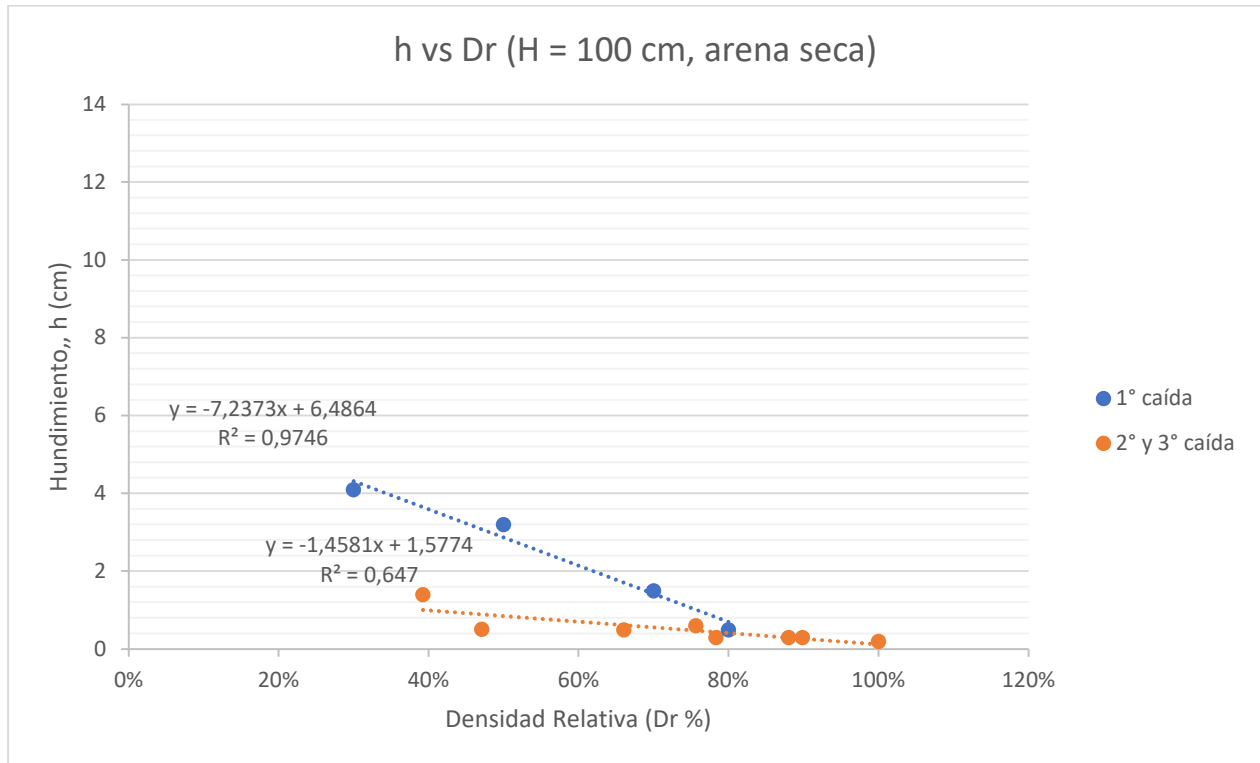
Anexo 17, hundimiento versus densidad relativa para caída de 70 cm a diferentes humedades de arena

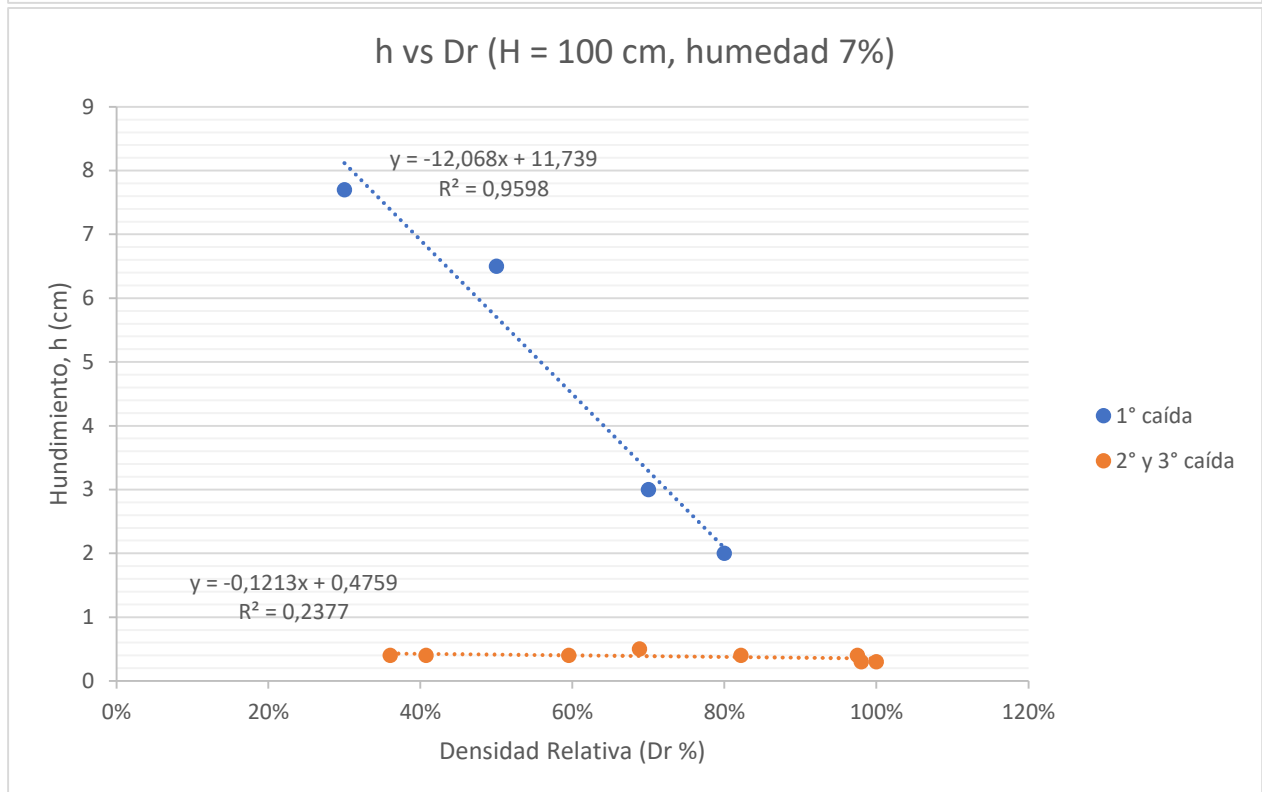
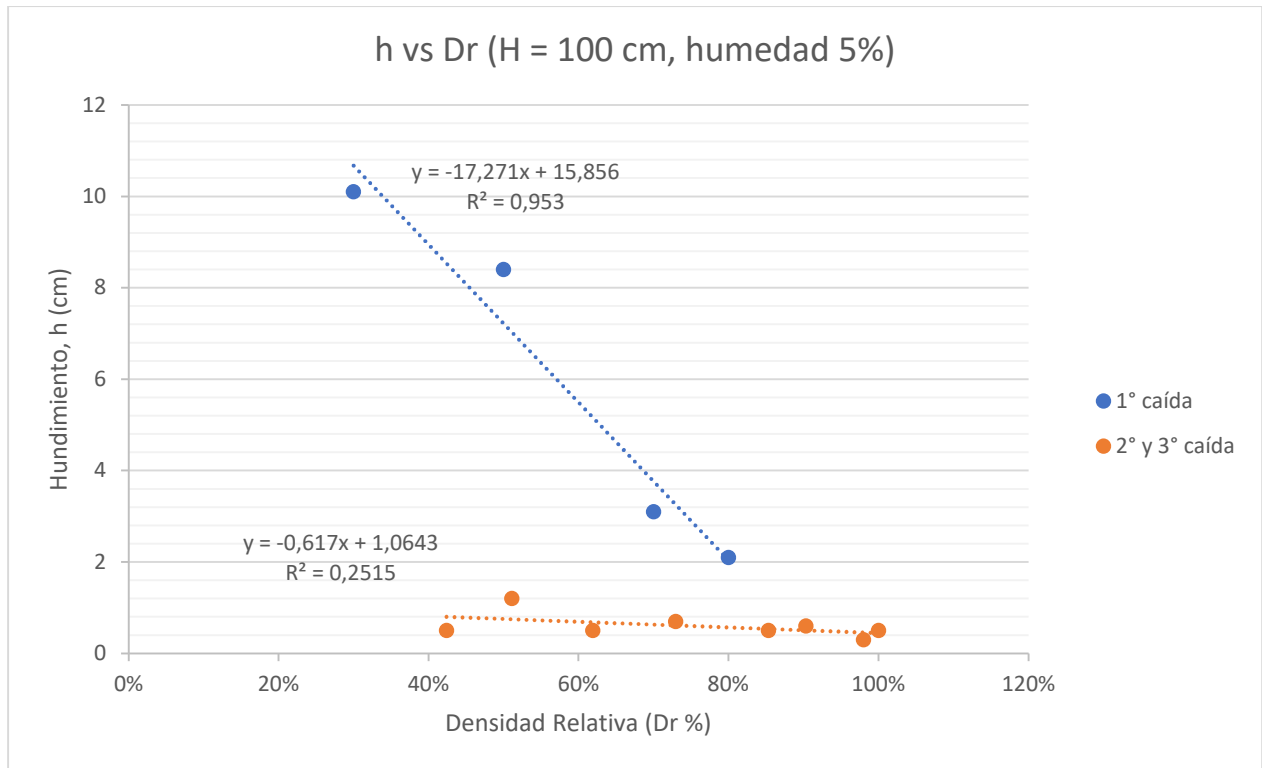


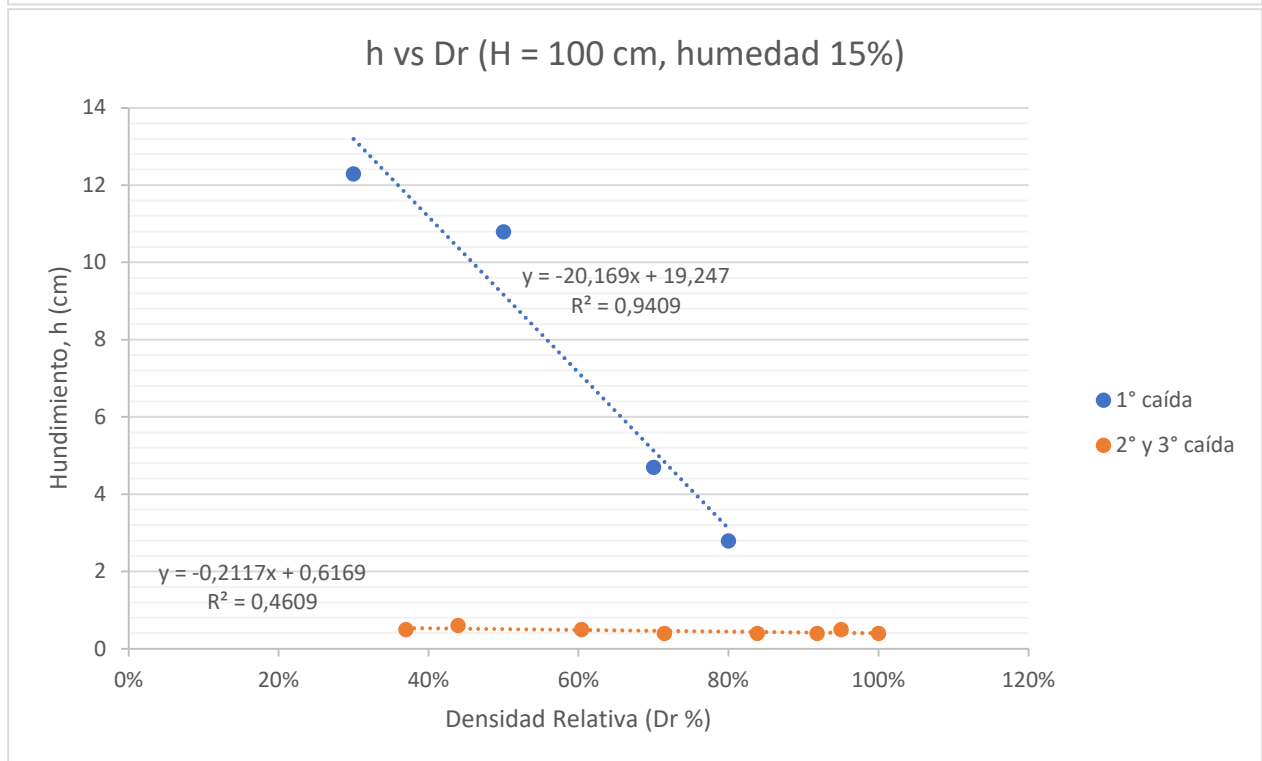
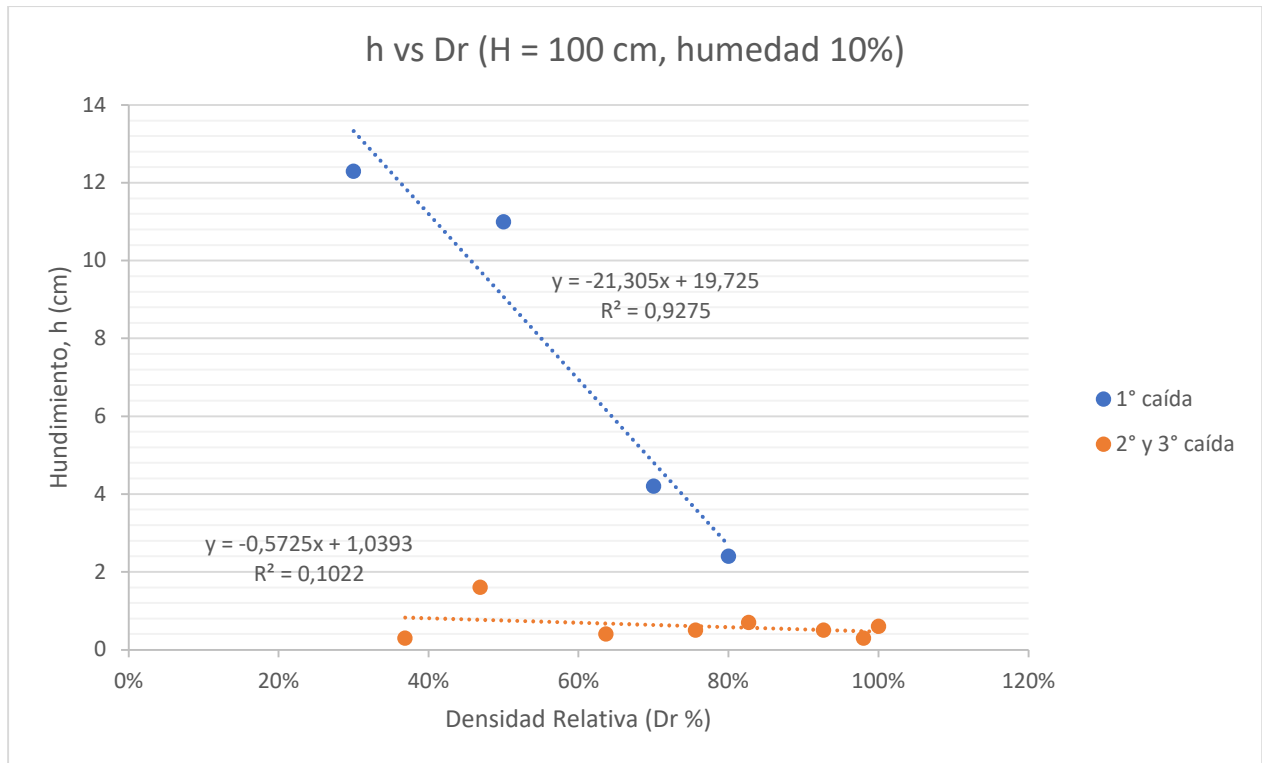




Anexo 18, hundimiento versus densidad relativa para caída de 100 cm a diferentes humedades de arena







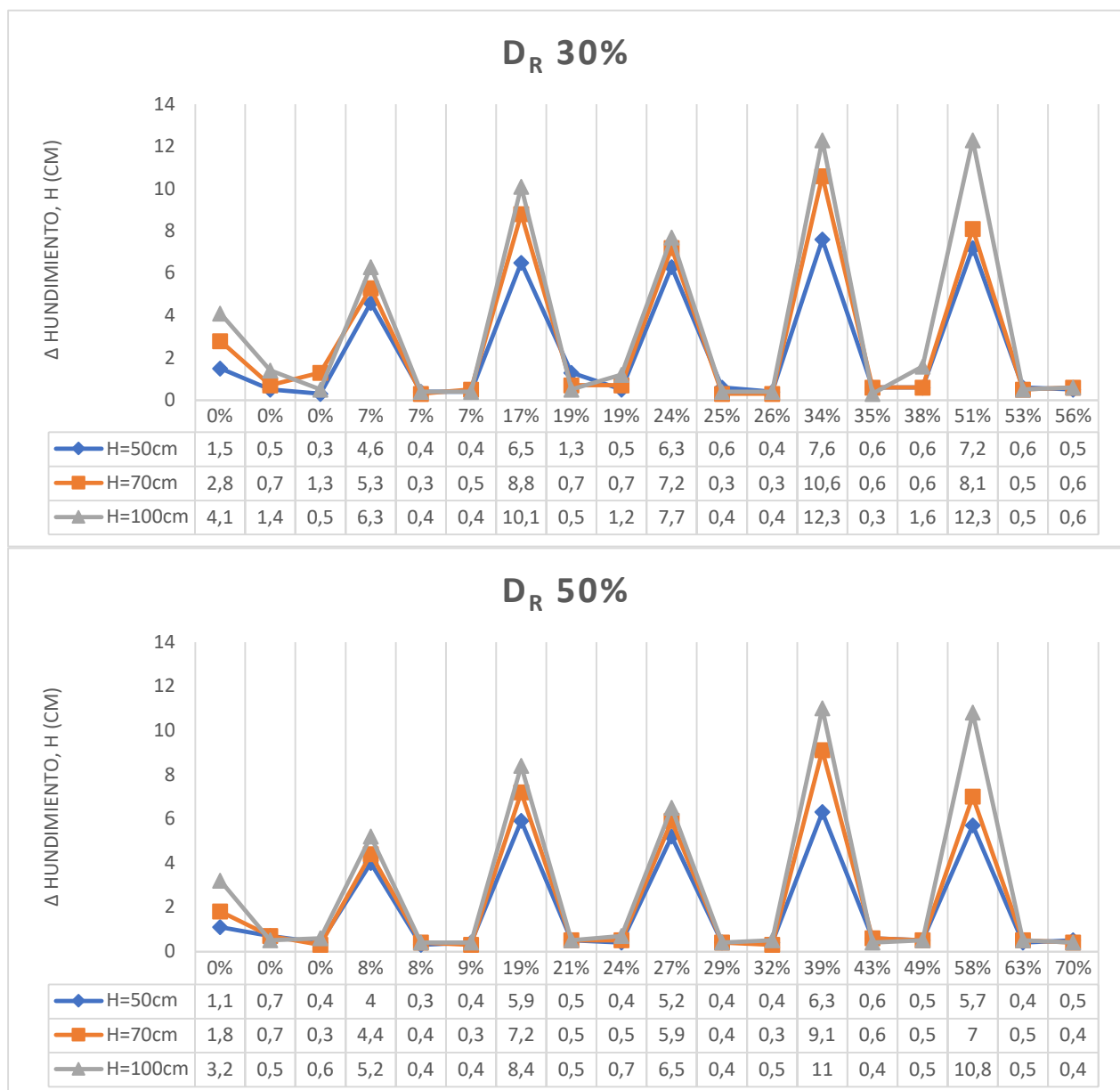
Anexo 19, diferencia entre caídas para diferentes humedades de arena

ARENA SECA					
D _r (%)	S _r (%)	N° ensayos	50 cm	70 cm	100 cm
30	0	1	1,5	2,8	4,1
39		2	0,5	0,7	1,4
47		3	0,3	1,3	0,5
50	0	1	1,1	1,8	3,2
66		2	0,7	0,7	0,5
76		3	0,4	0,3	0,6
70	0	1	1	1,2	1,5
78		2	0,2	0,2	0,3
90		3	0,3	0,3	0,3
80	0	1	0,2	0,4	0,5
88		2	0,2	0,1	0,3
100		3	0,1	0,2	0,2
HUMEDAD 2%					
D _r (%)	S _r (%)	N° ensayos	50 cm	70 cm	100 cm
30	7	1	4,6	5,3	6,3
35		2	0,4	0,3	0,4
40		3	0,4	0,5	0,4
50	8	1	4	4,4	5,2
58		2	0,3	0,4	0,4
67		3	0,4	0,3	0,4
70	9	1	1,5	2,1	2,8
79		2	0,3	0,4	0,4
87		3	0,3	0,4	0,3
80	10	1	1,6	2,1	2,5
95		2	0,4	0,3	0,4
100		3	0,3	0,3	0,3
HUMEDAD 5%					
D _r (%)	S _r (%)	N° ensayos	50 cm	70 cm	100 cm
30	17	1	6,5	8,8	10,1
42		2	1,3	0,7	0,5
51		3	0,5	0,7	1,2
50	19	1	5,9	7,2	8,4
62		2	0,5	0,5	0,5
73		3	0,4	0,5	0,7
70	23	1	2	2,5	3,1
85		2	0,3	0,6	0,5

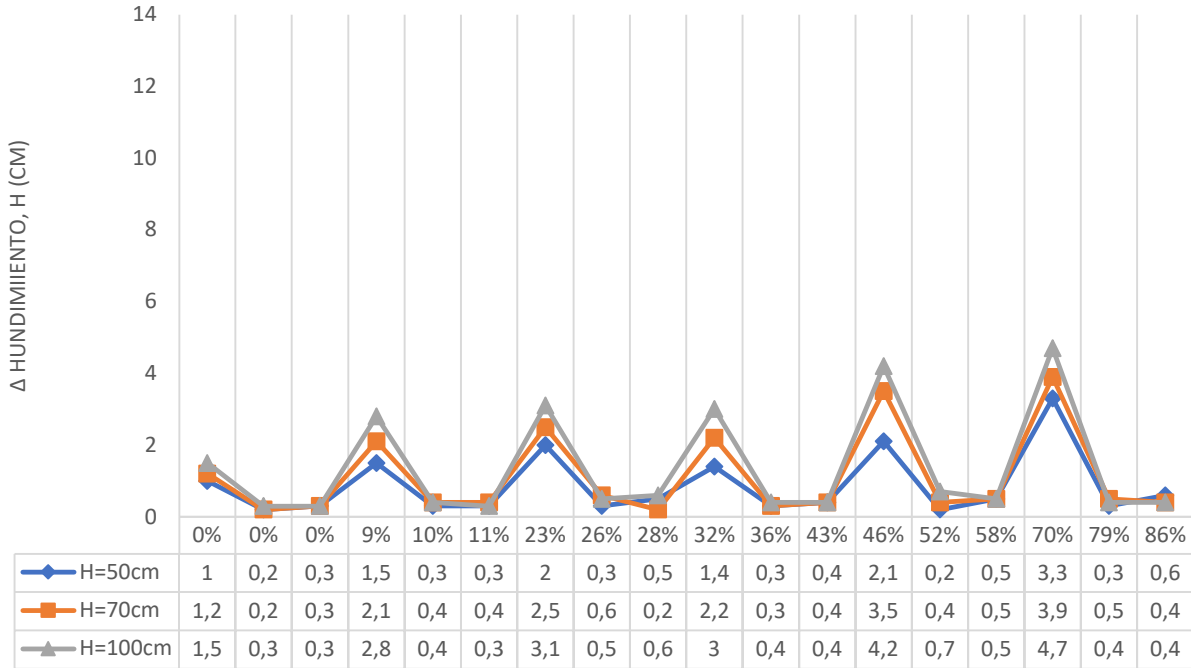
90		3	0,5	0,2	0,6
80	25	1	1,8	1,9	2,1
98		2	0,6	0,4	0,3
100		3	0,4	0,5	0,5
HUMEDAD 7%					
D _r (%)	S _r (%)	N° ensayos	50 cm	70 cm	100 cm
30	24	1	6,3	7,2	7,7
36		2	0,6	0,3	0,4
41		3	0,4	0,3	0,4
50	27	1	5,2	5,9	6,5
60		2	0,4	0,4	0,4
69		3	0,4	0,3	0,5
70	32	1	1,4	2,2	3
82		2	0,3	0,3	0,4
98		3	0,4	0,4	0,4
80	35	1	0,8	1,1	2
98		2	0,5	0,4	0,3
100		3	0,2	0,3	0,3
HUMEDAD 10%					
D _r (%)	S _r (%)	N° ensayos	50 cm	70 cm	100 cm
30	34	1	7,6	10,6	12,3
37		2	0,6	0,6	0,3
47		3	0,6	0,6	1,6
50	39	1	6,3	9,1	11
64		2	0,6	0,6	0,4
76		3	0,5	0,5	0,5
70	46	1	2,1	3,5	4,2
83		2	0,2	0,4	0,7
93		3	0,5	0,5	0,5
80	50	1	1,2	1,4	2,4
98		2	0,3	0,4	0,3
100		3	0,2	0,7	0,6
HUMEDAD 15%					
D _r (%)	S _r (%)	N° ensayos	50 cm	70 cm	100 cm
30	51	1	7,2	8,1	12,3
37		2	0,6	0,5	0,5
44		3	0,5	0,6	0,6
50	58	1	5,7	7	10,8
60		2	0,4	0,5	0,5

71	70	3	0,5	0,4	0,4
70		1	3,3	3,9	4,7
84		2	0,3	0,5	0,4
92		3	0,6	0,4	0,4
80	75	1	1,5	2	2,8
95		2	0,4	0,3	0,5
100		3	0,5	0,4	0,4

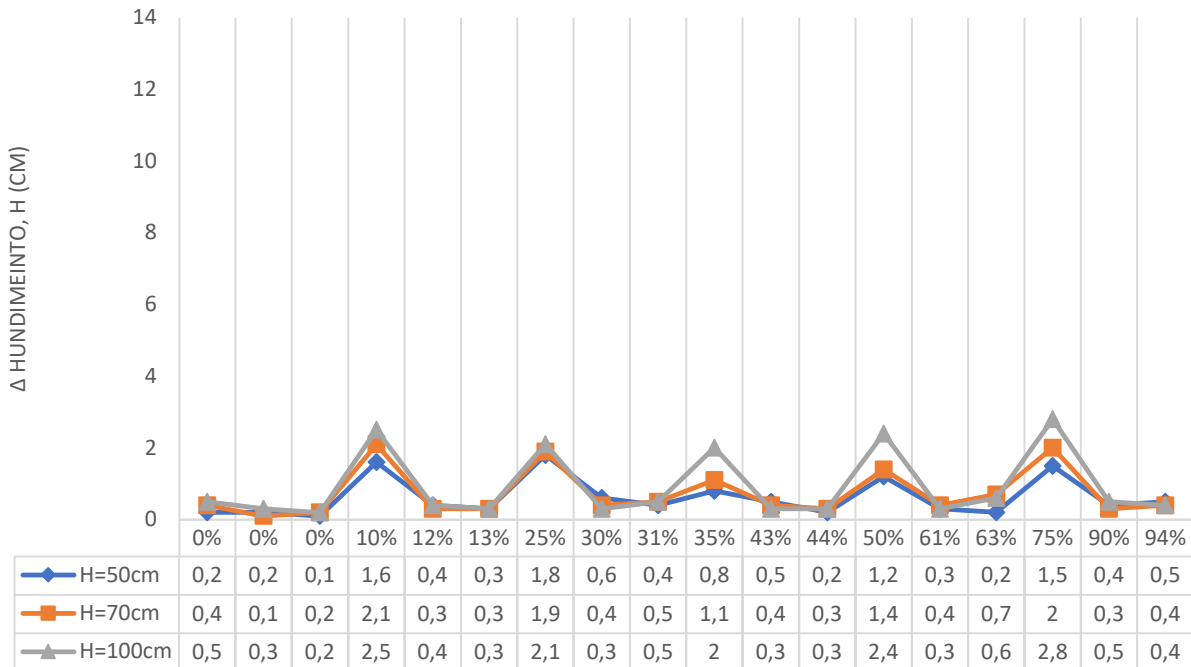
Anexo 20, gráfica diferencia de hundimientos para caída de 50, 70 y 100 cm para densidad relativa de 30, 50, 70 y 80%



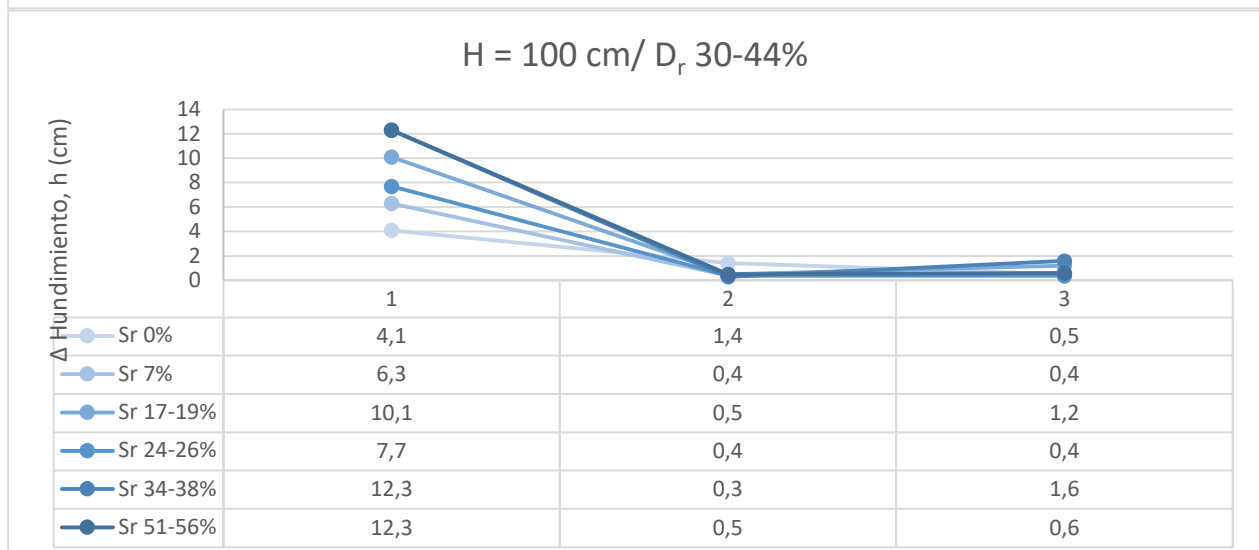
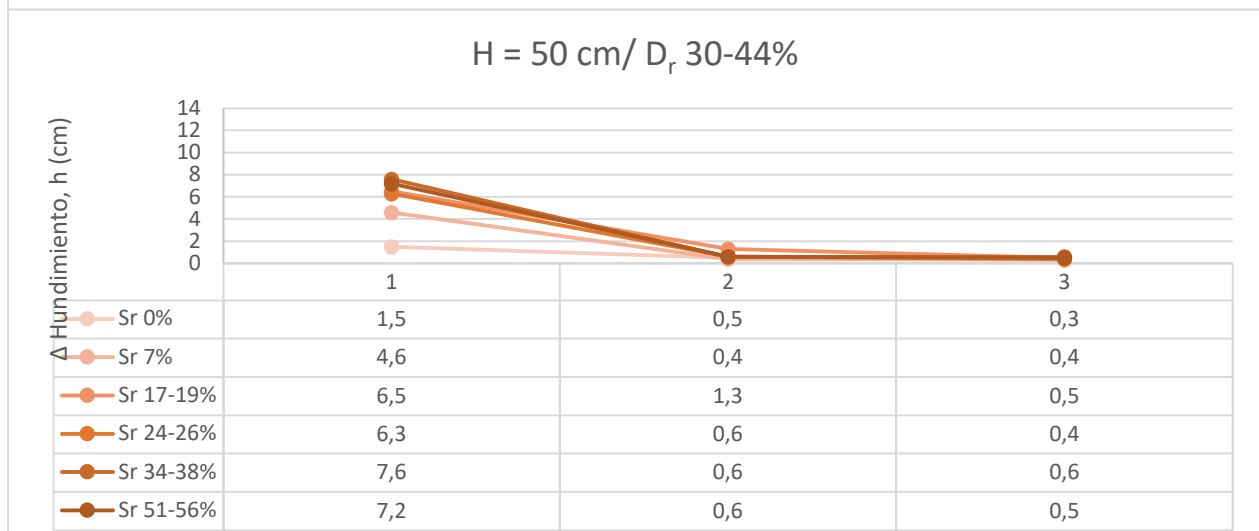
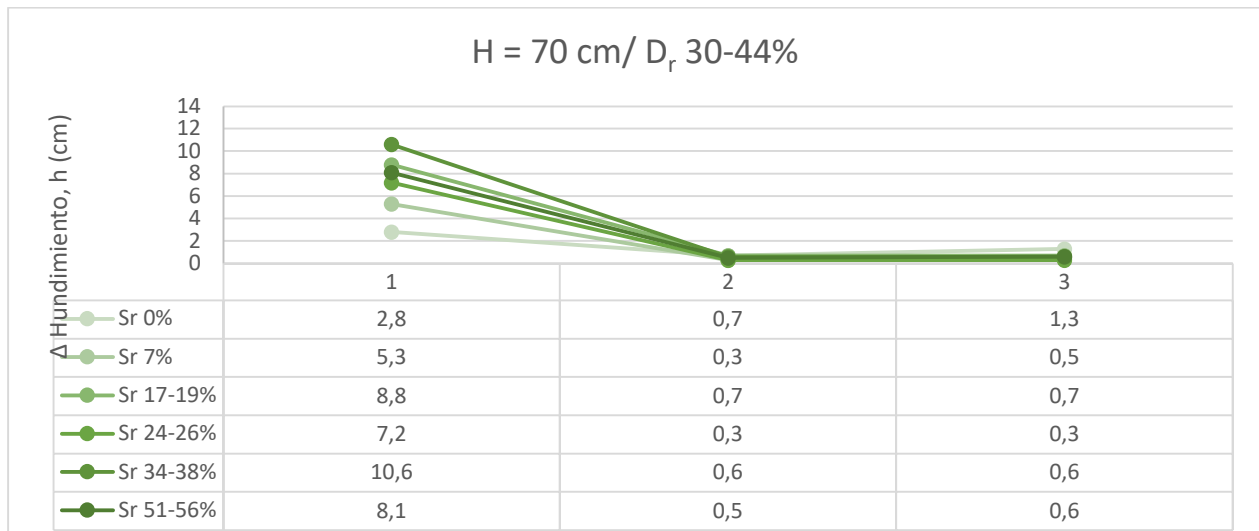
D_R 70%



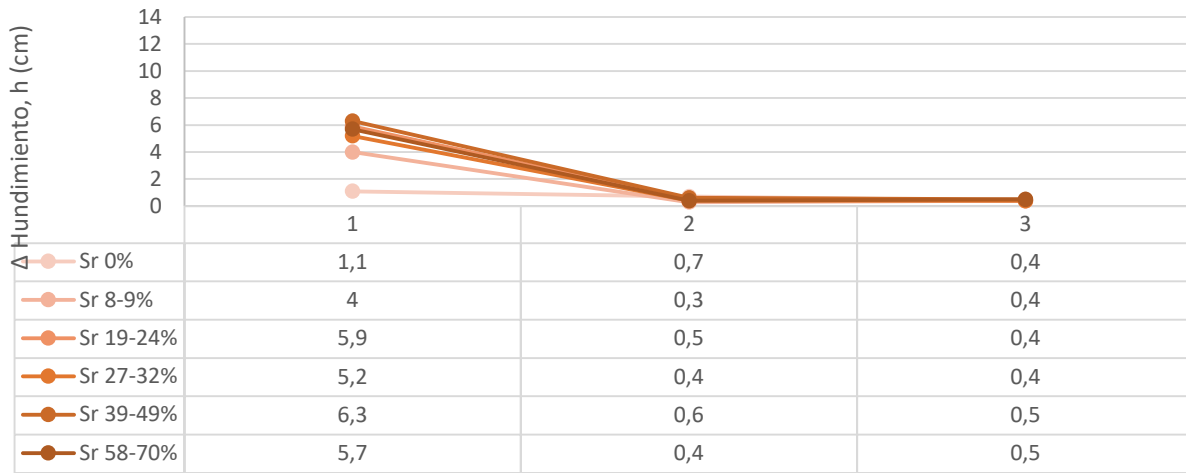
D_R 80%



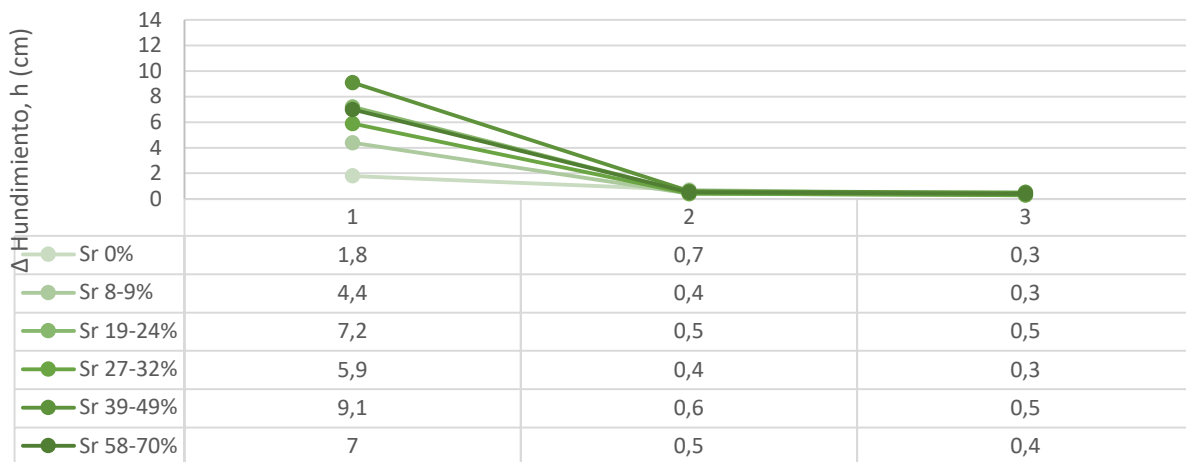
Anexo 21, Relación entre N° de caídas y saturación, separadas por altura de caída y rango de densidad relativa



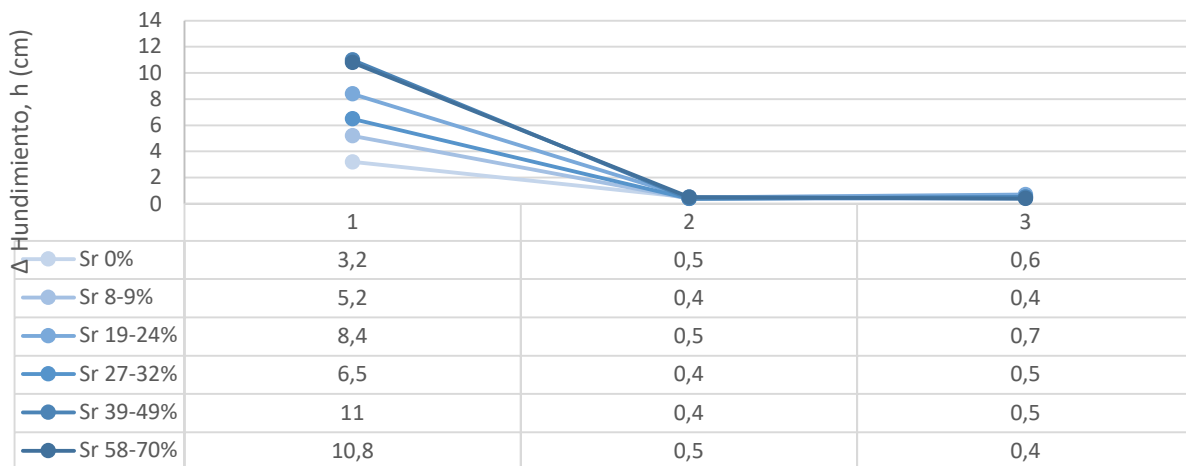
H = 50 cm / D_r 50-71%



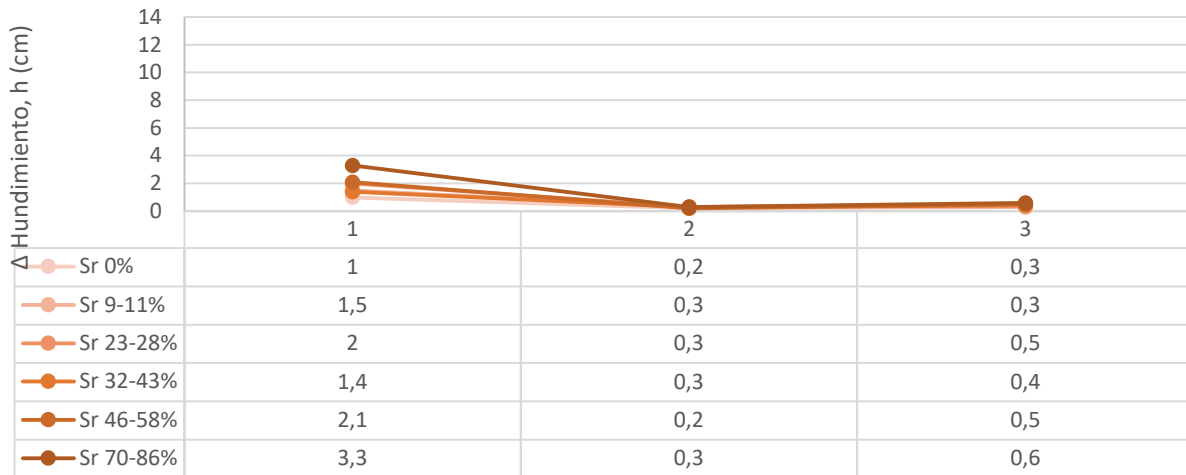
H = 70 cm / D_r 50-71%



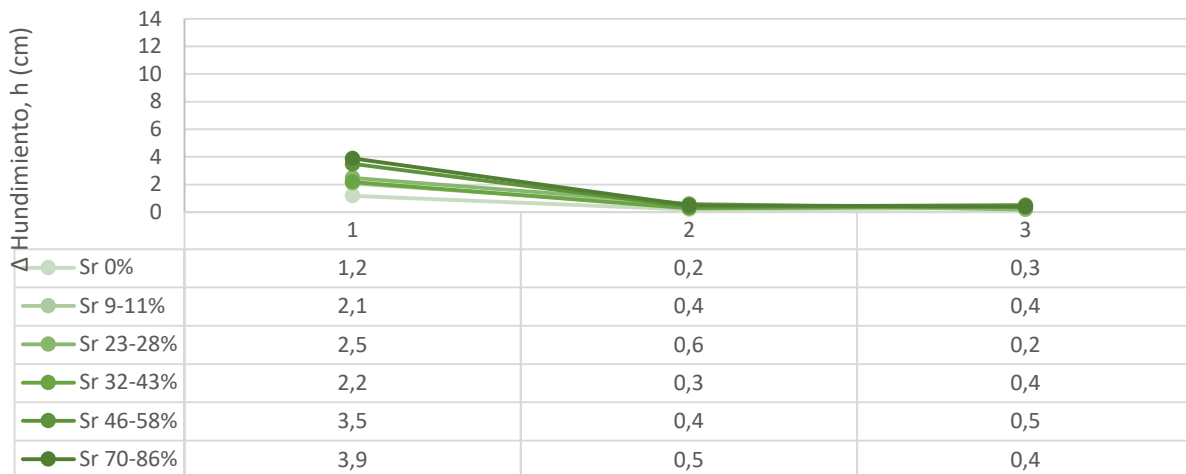
H = 100 cm / D_r 50-71%



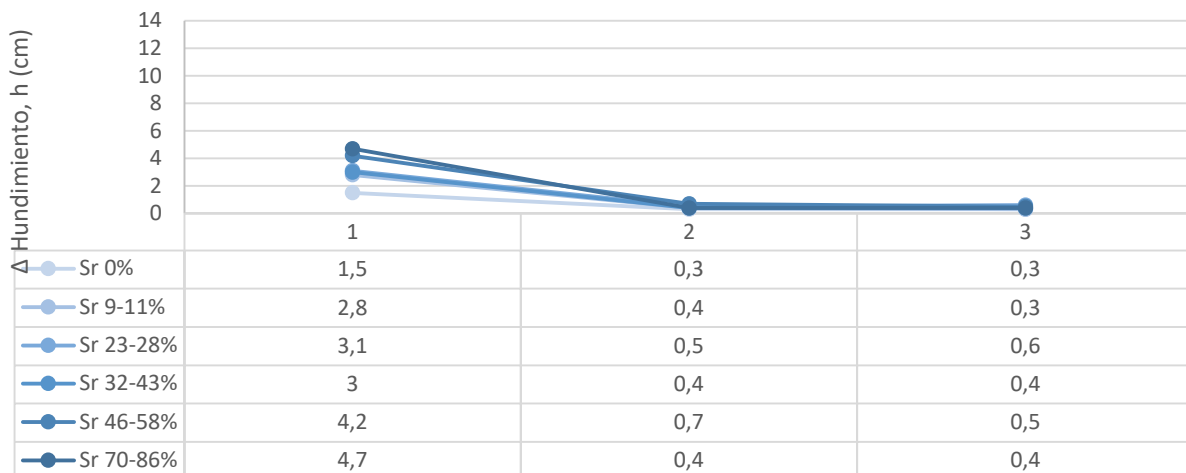
H = 50 cm / D_r 70-92%



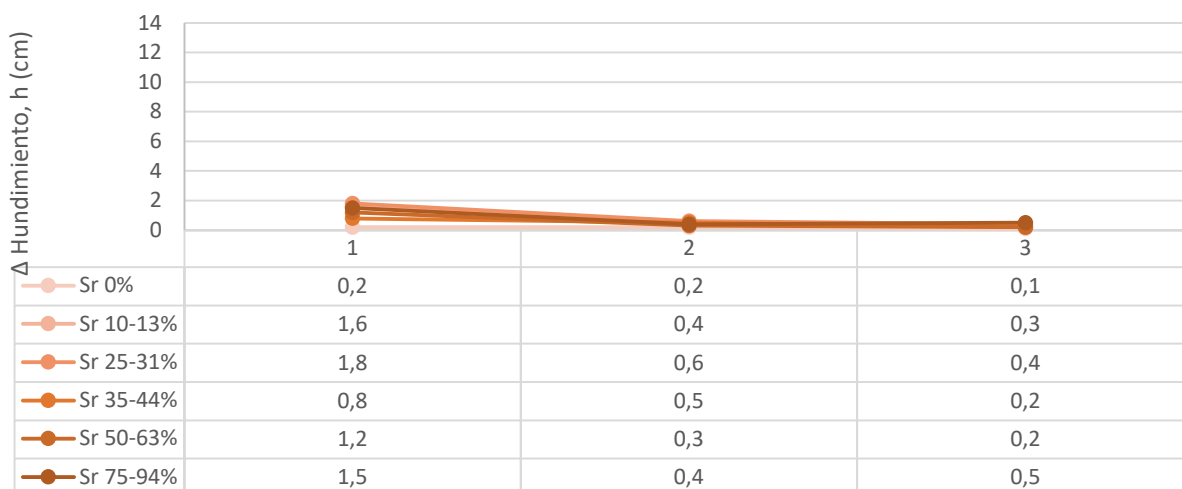
H = 70 cm / D_r 70-92%



H = 100 cm / D_r 70-92%



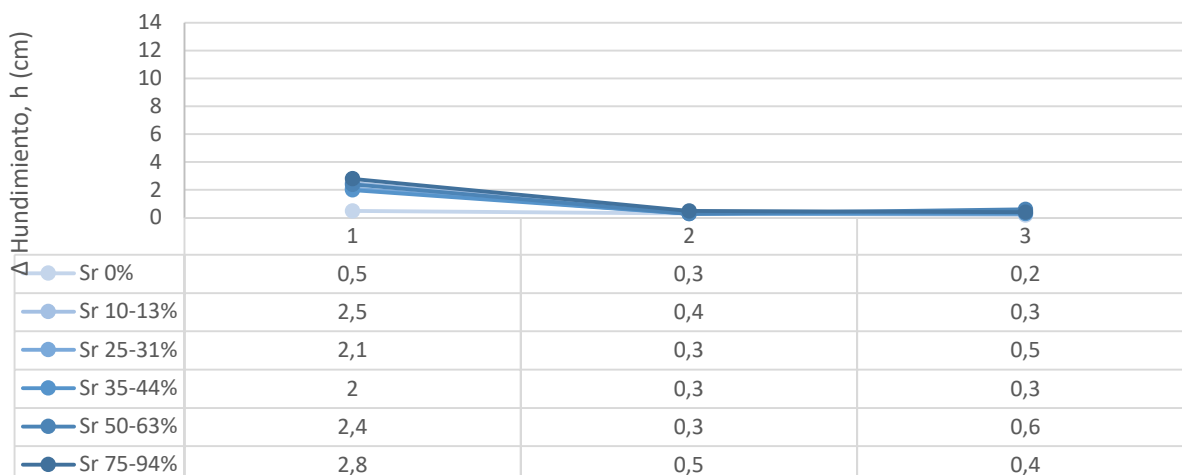
H = 50 cm / D_r 80-100%



H = 70 cm / D_r 80-100%



H = 100 cm / D_r 80-100%



Anexo 22, Espectro de caídas con variación de hundimiento versus su N° de caídas, para diferentes alturas de caídas y densidades relativas

