

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA

ESCUELA DE POSTGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA



**MEJORAMIENTO DEL TERRENO CON PILAS DE GRAVA
COMPACTADA PARA REDUCIR ASENTAMIENTOS
DIFERENCIALES EN UN CENTRO DE DISTRIBUCIÓN EN
HUACHIPA – LIMA 2022**

TESIS

Presentada por:

**Br. Martinelli Montoya, Maggie Antonieta
ORCID 0000-0001-8520-5790**

Asesor:

**Dr. Príncipe Reyes, Roger Alberto
ORCID: 0000-0002-0498-9544**

Para obtener el grado académico:

MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA

**TACNA – PERU
2023**

PÁGINA DEL JURADOS

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA

ESCUELA DE POSTGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA

Tesis

**“MEJORAMIENTO DEL TERRENO CON PILAS DE GRAVA
COMPACTADA PARA REDUCIR ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES
EN UN CENTRO DE DISTRIBUCIÓN EN HUACHIPA – LIMA 2022”**

Presentada por:

Br. Maggie Antonieta Martinelli Montoya

Tesis sustentada y aprobada el 07 de junio de 2023; ante el siguiente jurado examinador:

PRESIDENTE: Dr. Noribal Jorge ZEGARRA ALVARADO

SECRETARIO: Dr. Samuel HUAQUISTO CÁCERES

VOCAL: Mtro. Alfonso Oswaldo FLORES MELLO

ASESOR Dr. Roger Alberto PRÍNCIPE REYES

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo, Maggie Antonieta Martinelli Montoya, en calidad de egresada de la Maestría en Ingeniería con Mención en Geotecnia de la Escuela de Postgrado de la Universidad Privada de Tacna, identificada con DNI 08209108.

Soy autora de la tesis titulada: MEJORAMIENTO DEL TERRENO CON PILAS DE GRAVA COMPACTADA PARA REDUCIR ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES EN UN CENTRO DE DISTRIBUCIÓN EN HUACHIPA – LIMA 2022.

DECLARO BAJO JURAMENTO

Ser la única autora del texto entregado para obtener el grado académico de Maestra en Ingeniería Civil con mención en Geotecnia, y que tal texto no ha sido entregado ni total ni parcialmente para obtención de un grado académico en ninguna otra universidad o instituto, ni ha sido publicado anteriormente para cualquier otro fin.

Así mismo, declaro no haber trasgredido ninguna norma universitaria con respecto al plagio ni a las leyes establecidas que protegen la propiedad intelectual.

Declaro, que después de la revisión de la tesis con el software Turnitin se declara 25% de similitud, además que el archivo entregado en formato PDF corresponde exactamente al texto digital que presento junto al mismo.

Por último, declaro que para la recopilación de datos se ha solicitado la autorización respectiva a la empresa u organización, evidenciándose que la información presentada es real y soy conocedor (a) de las sanciones penales en caso de infringir las leyes del plagio y de falsa declaración, y que firmo la presente con pleno uso de mis facultades y asumiendo todas las responsabilidades de ella derivada.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo frente a LA UNIVERSIDAD cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra y/o invención presentada. En consecuencia, me hago responsable frente a LA UNIVERSIDAD y a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello en favor de terceros con motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la tesis, libro o invento.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiénome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Tacna, 7 de junio de 2023


Maggie Antonieta Martinelli Montoya
DNI 08209108

DEDICATORIA

A mi esposo Lolo y mis hijos Francesca, Erika, Christian y Alex por su comprensión y apoyo incondicional.

A mis padres quienes impulsaron mi educación y desarrollo profesional.

AGRADECIMIENTO

A la Escuela de Postgrado de la Universidad Privada de Tacna por el buen desarrollo de la maestría y brindarme la oportunidad de seguir los cursos y culminar los estudios satisfactoriamente.

A mis compañeros de la maestría de ingeniería civil con mención en geotecnia que, a pesar de encontrarnos en diferentes ciudades del Perú, generaron un clima de estudio motivador y de aliento para seguir adelante.

A mi asesor Dr. Roger Príncipe Reyes por su apoyo y asesoramiento para culminar la presente tesis.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|-------------|
| PÁGINA DEL JURADOS..... | i |
| DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD..... | ii |
| DEDICATORIA..... | iii |
| AGRADECIMIENTO..... | iv |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | viii |
| RESUMEN..... | xi |
| ABSTRACT..... | xii |
| INTRODUCCIÓN..... | xiii |
| 1 CAPÍTULO I EL PROBLEMA..... | 1 |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 1 |
| 1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... | 2 |
| 1.2.1 Interrogante principal..... | 3 |
| 1.2.2 Interrogantes específicas..... | 3 |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN..... | 3 |
| 1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN..... | 4 |
| 1.4.1 Objetivo general..... | 4 |
| 1.4.2 Objetivos específicos..... | 5 |
| 1.5 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN..... | 5 |
| 2 CAPITULO II MARCO TEÓRICO..... | 9 |
| 2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA..... | 9 |
| 2.2 BASES TEÓRICAS..... | 10 |
| 2.2.1 Suelo de fundación..... | 10 |
| 2.2.2 Clasificación de suelos..... | 10 |
| 2.2.3 Resistencia al corte..... | 12 |
| 2.2.4 Asentamientos..... | 12 |
| 2.2.5 Cálculo de asentamientos en un suelo granular..... | 12 |

| | |
|--|-----------|
| 2.2.6 Mejoramiento del terreno | 14 |
| 2.2.7 Mejoramiento del terreno con pilas de agregado compactado..... | 15 |
| 2.2.8 Metodología de diseño de pilas de agregado compactado | 15 |
| 2.2.9 Cálculo del asentamiento en la zona superior mediante la analogía de resortes | 16 |
| 2.2.10 Cálculo de asentamiento en la zona superior empleando la metodología de módulo elástico compuesto | 20 |
| 2.2.11 Cálculo del asentamiento en la zona inferior | 22 |
| 2.3 DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS | 23 |
| 2.3.1 Propiedades mecánicas de los suelos | 23 |
| 2.3.2 Asentamiento diferencial | 24 |
| 2.3.3 Pila de agregado compactado..... | 24 |
| 3 CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO..... | 25 |
| 3.1 HIPÓTESIS | 25 |
| 3.1.1 Hipótesis general..... | 25 |
| 3.1.2 Hipótesis específicas | 25 |
| 3.2 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES | 25 |
| 3.2.1 Identificación de las variables | 25 |
| 3.2.2 Indicadores | 25 |
| 3.3 TIPO DE INVESTIGACIÓN | 27 |
| 3.4 NIVEL DE INVESTIGACIÓN..... | 27 |
| 3.5 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN | 27 |
| 3.6 ÁMBITO DE LA INVESTIGACIÓN | 27 |
| 3.7 POBLACIÓN Y MUESTRA..... | 28 |
| 3.7.1 Unidad de estudio..... | 28 |
| 3.7.2 Población..... | 28 |
| 3.7.3 Muestra..... | 28 |
| 3.8 RECOLECCIÓN DE DATOS | 28 |
| 3.8.1 Procedimiento | 28 |
| 3.8.2 Técnicas de recolección de datos | 29 |
| 3.8.3 Instrumentos..... | 30 |

| | |
|--|-----------|
| 4 CAPÍTULO IV RESULTADOS | 36 |
| 4.1 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO | 36 |
| 4.2 PERFIL DEL SUELO | 45 |
| 4.3 SOLICITACIONES DE CARGA | 49 |
| 4.4 CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS DEL SUELO NATURAL | 49 |
| 4.5 ALTERNATIVAS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS | 52 |
| 4.6 CÁLCULO DEL MEJORAMIENTO DE SUELOS CON LAS PILAS DE AGREGADO COMPACTADO | 55 |
| 4.7 SOLUCIÓN DE DISEÑO | 61 |
| 4.8 VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN | 62 |
| 5 CAPÍTULO V DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 65 |
| 5.1 EVALUACIÓN DE RESULTADOS | 65 |
| 6 CAPÍTULO VI PROPUESTA DE SOLUCIÓN | 67 |
| 6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA FOCALIZADO | 67 |
| 6.1.1 Problemática de los centros de distribución..... | 67 |
| 6.1.2 Características particulares del caso..... | 68 |
| 6.2 DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA | 69 |
| 6.3 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO | 72 |
| 6.4 CONTROL DE CALIDAD DE LAS PILAS DE AGREGADO COMPACTADO | 78 |
| 6.4.1 Prueba de Módulo de Rigidez | 78 |
| 6.4.2 Prueba de Estabilización Estática..... | 81 |
| 7 CONCLUSIONES | 83 |
| 8 RECOMENDACIONES | 85 |
| 9 REFERENCIAS | 87 |
| APÉNDICES | 91 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 3.1 Variables, dimensiones e indicadores | 26 |
| Tabla 4.1 Resultados de los análisis granulométricos por tamizado y límites de Atterberg en muestras representativas de la perforación WB-3..... | 44 |
| Tabla 4.2 Resultados de los análisis granulométricos por tamizado y límites de Atterberg en muestras representativas de la perforación WB-7..... | 44 |
| Tabla 4.3 Resultados de los análisis granulométricos por tamizado y límites de Atterberg en muestras representativas de la perforación WB-10..... | 45 |
| Tabla 4.4 Resultado del ensayo de resistencia a la compresión no confinada, densidad seca y húmeda perforación WB-10..... | 45 |
| Tabla 4.5 Parámetros de resistencia al corte perforación WB-3..... | 47 |
| Tabla 4.6 Parámetros de resistencia al corte perforación WB-7..... | 48 |
| Tabla 4.7 Parámetros de resistencia al corte perforación WB-10..... | 48 |
| Tabla 4.8 Asentamientos totales y diferenciales esperados | 51 |
| Tabla 4.9 Estadística de asentamientos esperados en cm en el suelo reforzado considerando los perfiles de suelos de las perforaciones | 63 |
| Tabla 6.1 Detalle de cargas de compresión aplicadas durante la prueba de módulo de rigidez..... | 79 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Sistema de clasificación de suelos unificado..... | 11 |
| Figura 2.2 Modelo de dos zonas | 16 |
| Figura 2.3 Esquema de pila de agregado compactado | 17 |
| Figura 2.4 Analogía de resortes de diseño | 17 |
| Figura 3.1 Esquema de equipo de penetración estándar SPT | 31 |
| Figura 3.2 Instrumentos para granulometría por tamizado | 32 |
| Figura 3.3 Instrumentos para ejecutar límite líquido | 33 |
| Figura 3.4 Instrumentos para ejecutar límite plástico | 34 |
| Figura 3.5 Equipo de compresión no confinada..... | 35 |
| Figura 4.1 Vista donde se indica la ubicación de la zona donde se ubicará la nueva nave de secos..... | 36 |
| Figura 4.2 Ubicación de las perforaciones efectuadas | 38 |
| Figura 4.3 Vista donde se aprecia la ejecución de una de las perforaciones cerca de la nave colindante existente | 39 |
| Figura 4.4 Ejecución de un ensayo de penetración estándar en la perforación P-21 | 39 |
| Figura 4.5 Perfil de suelos de la perforación WB-3..... | 41 |
| Figura 4.6 Perfil de suelos de la perforación WB-7..... | 42 |
| Figura 4.7 Perfil de suelo de la perforación WB-10 | 43 |
| Figura 4.8 Sección estratigráfica central del terreno..... | 46 |
| Figura 4.9 Modelo tridimensional para estimación de asentamiento en condición mejorada..... | 60 |
| Figura 4.10 Resultados de asentamientos diferenciales entre rieles de racks en condición mejorada con pilas de agregado compactado | 61 |
| Figura 4.11 Histograma de asentamientos esperados en el suelo reforzado | 63 |
| Figura 4.12 Resultados de prueba T de student en Minitab..... | 64 |
| Figura 6.1 Esquema de solución propuesta con pilas de agregado compactado... | 71 |
| Figura 6.2 Distribución de pilas de agregado compactado | 71 |

| | |
|---|----|
| Figura 6.3 Secuencia constructiva de las pilas de agregado compactado (tipo 1) | 73 |
| Figura 6.4 Secuencia constructiva de las pilas de agregado compactado (tipo 1) | 74 |
| Figura 6.5 Compactación final de plataforma con rodillo vibratorio (imagen referencial) | 74 |
| Figura 6.6 Máquina con mandril apisonador para secuencia tipo 1 (imagen referencial) | 75 |
| Figura 6.7 Máquina con mandril apisonador para secuencia tipo 2 (imagen referencial) | 76 |
| Figura 6.8 Barrenado previo a la instalación de pilas de agregado compactado .. | 76 |
| Figura 6.9 Foto de la excavadora con aditamento para extraer material | 77 |
| Figura 6.10 Equipo de carguío (imagen referencial) | 77 |
| Figura 6.11 Vista del tope de una pila de agregado compactado construida | 78 |
| Figura 6.12 Esquema de la prueba de módulo de rigidez usando excavadora de reacción (referencial) | 80 |
| Figura 6.13 Viga de contrapeso en una prueba de módulo de rigidez | 81 |
| Figura 6.14 Plato de carga instalado bajo la viga en una prueba de módulo de rigidez | 81 |

RESUMEN

El propósito de esta tesis es diseñar el sistema de mejoramiento de suelos mediante la incorporación de pilas de grava compactada en el terreno donde se emplazará un almacén dentro de un centro de distribución ubicado en Huachipa, distrito de Lurigancho – Chosica, provincia y departamento de Lima. El objeto del mejoramiento es reducir los asentamientos diferenciales por efecto de las cargas de los racks acumulativos que se instalarán. El terreno de fundación existente es heterogéneo, predominantemente arenoso de baja resistencia y deformable. La investigación es aplicada, con un enfoque cuantitativo y diseño experimental. Para evaluar las características y propiedades del terreno de fundación se tomó en cuenta la información de 21 perforaciones. Para determinar valores de asentamientos del terreno natural se utilizó una metodología geotécnica convencional con base a los valores obtenidos en los ensayos de penetración estándar SPT de las perforaciones. Para evaluar los asentamientos en el terreno reforzado se utilizó el método de módulo ponderado que toma en cuenta la rigidez de los elementos incorporados. Finalmente se obtuvo el diseño de reforzamiento requerido para mitigar los asentamientos al máximo tolerable. El sistema de mejoramiento determinado incluye pilas de agregado compactado de 0,61 m de diámetro, 4,10 m de longitud, espaciadas 2,40 m entre centros, distribuidas en toda el área del almacén. Entre la losa de piso del almacén que recibirá las cargas de los racks y el suelo reforzado, se considera una capa de transferencia de material granular seleccionado compactado de 0,40 m de espesor.

Palabras claves: mejoramiento de suelos, pilas de grava compactada, asentamientos diferenciales.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to propose a ground improvement system through the incorporation of compacted stiff columns of rammed aggregate on the land where a warehouse of a distribution center will be built, in the area of Huachipa, district of Lurigancho - Chosica, city and province of Lima. The goal with the improvement system is to reduce the differential settlements due to the effect of cumulative racks to be installed. The foundation soil is heterogeneous, predominantly sandy, with low resistance and deformability. The research is applicative, with a quantitative and experimental design emphasis. Information obtained from 21 wash boring is used to evaluate the properties and characteristics of the foundation soil. In order to determine the settlements of the natural soil values, a conventional geotechnical methodology with base to the standard SPT penetration tests of the boring was utilized. For the settlements on the reinforced soil with compacted stiff columns of rammed aggregate, the weighted module method was used, which takes into account the rigidity of the incorporated elements. Finally, the reinforcement design required for mitigating the maximum tolerance settlements was obtained. The determined ground improvement system includes compacted 0,61 m diameter compacted stiff columns of rammed aggregate, with a length of 4,10 meters, spaced 2,40 meters between centers, distributed throughout the whole area of the warehouse. Between the warehouse floor slab which will receive the rack loads and the reinforced soil, a layer of selected granular 0,40 meters thickness material is considered for load transfer.

Keywords: ground improvement, stiff columns of rammed aggregate, differential settlements.

INTRODUCCIÓN

Actualmente la ingeniería geotécnica se encuentra en evolución y están en pleno desarrollo diferentes técnicas de mejoramientos de suelos que permiten incrementar la capacidad portante del suelo natural, mitigar la magnitud de los asentamientos por efecto de las cargas transmitidas por las estructuras, mitigar el fenómeno de licuefacción y uniformizar el comportamiento del suelo. El estudio de estas técnicas de mejoramiento ha sido impulsado por las necesidades actuales de las obras de ingeniería, cuya ubicación no está supeditada a características geotécnicas favorables de los suelos, sino a disponibilidad de terrenos y ubicaciones estratégicas para el negocio, ya sea este inmobiliario o industrial. Es así, que muchas veces los terrenos presentan deficientes propiedades mecánicas para recibir las cargas de las estructuras proyectadas y permiten en su estado natural, la ocurrencia de asentamientos mayores que los tolerables por las estructuras y equipos a instalar en el caso de obras industriales. En otros casos, se tienen problemas especiales como licuefacción durante sismos, suelos colapsables, orgánicos entre otros.

En general, el objetivo principal de estas técnicas de mejoramiento, que se consideran como soluciones geotécnicas intermedias, es brindar una alternativa técnica y económica a soluciones tradicionales como lo son las cimentaciones profundas con pilotes estructurales y los reemplazos de volúmenes importantes de suelos.

En la presente tesis se diseña un sistema de mejoramiento de suelos mediante la incorporación de pilas de agregado compactado en el terreno donde se emplazará un almacén dentro de un centro de distribución ubicado en Huachipa, distrito de Lurigancho – Chosica, provincia y departamento de Lima, el cual tiene exigencias específicas en cuanto a los asentamientos tolerables. Esta técnica de mejoramiento, además de mitigar los asentamientos del suelo, resulta ser amigable con el medio ambiente, ya que no se introducen en el terreno elementos diferentes al suelo, lo cual puede utilizarse para obtener puntos en el criterio de sostenibilidad

en los materiales y recursos de construcción para la obtención de certificaciones LEED.

El trabajo de tesis consta de seis capítulos. En el capítulo I se detalla el planteamiento del problema, la justificación de la investigación y los objetivos de la misma; se incluyen además en este capítulo, los antecedentes internacionales, nacionales y regionales. En el capítulo II se desarrolla el marco teórico de sustento del sistema de mejoramiento.

La metodología de trabajo se presenta en el capítulo III, donde se detallan las variables y sus respectivos indicadores, el tipo, nivel y diseño de la investigación; asimismo se describen las técnicas e instrumentos de recopilación de datos.

Los cálculos y análisis efectuados para obtener la solución de diseño se presentan en el capítulo IV, la discusión de resultados se presenta en el capítulo V y la propuesta de solución se presenta en el capítulo VI, donde se incluyen las características del mejoramiento, el proceso constructivo y el detalle de las pruebas recomendadas para el control de calidad.

Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas en la investigación y recomendaciones.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se ha previsto construir un almacén de tipo autoportante dentro de un centro de distribución (CD) ubicado en la localidad de Huachipa, distrito de Lurigancho - Chosica, provincia y departamento de Lima. El almacén auto soportado contará con racks acumulativos de 20 m de altura con diferentes niveles, siendo el sistema de control de mercancías automatizado con robots móviles y autónomos que transitarán sobre losas super planas, con restricciones en cuanto a los asentamientos diferenciales tolerables, según lo estipulado en la memoria de cálculo estructural del almacén (Praxis, 2021).

Dado a las elevadas cargas de los racks y las particularidades de los suelos registrados en el estudio de mecánica de suelos del lugar, los cuales son heterogéneos, de baja resistencia y deformables (Martinelli, 2021), en este caso es necesario considerar el mejoramiento del suelo de fundación.

Existen en la actualidad diferentes técnicas para mejorar el terreno, como lo son la vibro compactación, inyecciones, compactación dinámica, inclusiones rígidas, columnas de grava, entre otras. La elección de la mejor técnica para cada caso obedece a aspectos técnicos y económicos, que incluyen efectividad de la técnica para el tipo de suelo por mejorar, facilidad de trabajo de los equipos requeridos, disponibilidad de materiales, entre otros factores (Bielza, 1999). Cada caso debe ser analizado para elegir la solución técnica y económica más adecuada.

Entre las técnicas de mejoramiento del suelo de fundación se encuentran las pilas de grava compactada (Bielza, 1999), que son las que se analizarán en el presente proyecto de investigación, con la finalidad de recibir las cargas de los racks y las losas de piso del almacén, buscando lograr la reducción de asentamientos diferenciales.

Respecto a la técnica de mejoramiento y refuerzo del terreno que se plantea en la presente investigación, a nivel internacional de acuerdo con Fattah, Al-Neami, & Shamel Al-Suhaily (2017), las columnas de piedra resultan ser una de las técnicas de mejora del suelo, con desempeño probado, tiempo de ejecución corto, durable, de fácil ejecución y bajos costos. Esta técnica se ha usado como método de refuerzo de suelos blandos durante los últimos 30 años (V. 20, I 3).

Cabe señalar, que el requerimiento de mejoramiento de terrenos en centros de distribución es usual, ya que éstos se desplantan en áreas grandes de terreno, los cuales normalmente no presentan características uniformes que puedan garantizar la ocurrencia de asentamientos diferenciales reducidos en respuesta a la aplicación de incrementos de cargas correspondientes a las estructuras y los racks acumulativos. Considerando lo indicado y que los terrenos son cada vez más escasos y costosos, según Romana Ruiz (2004), resultan cada vez más económicas y utilizadas todas las técnicas que pueden contribuir a crear, mejorar y aprovechar mejor, los espacios, aunque el terreno no sea el mejor desde el punto de vista geotécnico; y como consecuencia de lo indicado, se han desarrollado diversas técnicas a nivel mundial para mejorar el comportamiento del terreno (p. 219). Entre las técnicas más usadas están las pilas de grava compactada.

Con relación a los asentamientos, según Alva (2012) “el asentamiento tiene importancia por tres razones: aspecto, condiciones de servicio y daños a la estructura”. Los tipos de asentamiento son: asentamiento uniforme, inclinación, y asentamiento no-uniforme. El asentamiento diferencial que es la diferencia de asentamientos máximos entre dos puntos es el que origina la distorsión angular (p. 60-61). En el presente caso, el asentamiento diferencial es el que controlará el diseño.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Teniendo en cuenta lo indicado en el planteamiento del problema en el centro de distribución (CD) respecto a las características del terreno de fundación del almacén

y las restricciones en cuanto a los asentamientos diferenciales tolerables, las preguntas a considerar en la presente investigación serán:

1.2.1 Interrogante principal

- ✓ ¿Se podría mejorar el terreno de fundación del almacén del centro de distribución ubicado en Huachipa - Lima 2022 mediante la incorporación de pilas de grava compactada para reducir los asentamientos diferenciales?

1.2.2 Interrogantes específicas

- ✓ ¿Se pueden estimar los asentamientos diferenciales a partir de las propiedades mecánicas del suelo de fundación del almacén del CD?
- ✓ ¿Qué metodologías de mejoramiento de suelos reducen los factores de riesgo por los asentamientos diferenciales generados en el terreno de fundación del almacén del CD?
- ✓ ¿Se puede reducir los asentamientos diferenciales con la incorporación de pilas de grava compactada en el suelo de fundación del almacén del CD?

1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se justifica porque en el estudio de mecánica de suelos del terreno donde se construirá el almacén, se ha determinado una estratigrafía variable, altamente susceptible a la ocurrencia de asentamientos por efecto de los incrementos de cargas que le transmitirán los racks acumulativos proyectados (Martinelli, 2021). Se busca que el mejoramiento y reforzamiento del terreno permita que el suelo pueda recibir las cargas del almacén, garantizando la ocurrencia de asentamientos diferenciales menores al especificado que es de 1 cm (Praxis, 2021).

Cabe señalar, que la ocurrencia de asentamientos diferenciales mayores que los exigidos por el fabricante del sistema automatizado de racks y estipulados en la memoria de cálculo estructural del piso, no solo afectarán el adecuado funcionamiento de los robots y por ende del centro de distribución, sino que se corre el riesgo de perder la garantía de los equipos adquiridos para el funcionamiento del

almacén. Evidentemente la formación de fisuras o hundimientos localizados serán aspectos críticos desfavorables y no deseados, que impedirán un buen funcionamiento.

A diferencia de otros tipos de obras que las deformaciones del suelo pueden afectar algunos equipos o afectar la estética, en el caso del CD robotizado proyectado, estas deformaciones afectarían su funcionamiento y por ende, la inversión, generando pérdidas económicas importantes.

Con esta investigación se propone generalizar la técnica de mejoramiento del terreno con pilas de grava compactada para diferentes tipos de proyectos. Si bien la propuesta de investigación es para un problema específico de limitación de asentamientos diferenciales en losas super planas requeridas para centros de distribución automatizados, es posible usar esta técnica en diferentes tipos de proyectos, tales como hospitales, instituciones educativas, edificios, plantas de agua y energía, entre otros, resultando una solución técnica y económica adecuada.

Por lo indicado se puede concluir que esta investigación es relevante ya que los resultados pueden socializarse a zonas y diferentes tipos de obras proyectadas en terrenos heterogéneos, terrenos con deficiente capacidad portante, como es el caso CD de Huachipa, y lugares donde puedan producirse deformaciones importantes, tal como es el caso de los suelos potencialmente licuables.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo general

- **Analizar** el mejoramiento de suelos con pilas de grava compactada para reducir los asentamientos diferenciales del terreno de fundación del almacén del CD, en Huachipa – Lima 2022.

1.4.2 Objetivos específicos

- **Estimar** los asentamientos diferenciales por efecto de las cargas de los racks a partir de las propiedades mecánicas del suelo de fundación del almacén del CD.
- **Evaluar** las metodologías de mejoramiento de suelos que reducen los factores de riesgo por los asentamientos diferenciales en el terreno de fundación del almacén del CD.
- **Reducir** los asentamientos diferenciales con la incorporación de pilas de grava compactada en el suelo de fundación del CD.

1.5 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Existen diversidad de investigaciones y tesis donde se evalúan soluciones de mejoramiento de suelos como alternativa a soluciones tradicionales que resultan ser similares a la propuesta para el centro de distribución en función a características particulares de los suelos de cada terreno, de las obras proyectadas y sus requerimientos específicos. Podemos destacar las siguientes:

a) En el ámbito internacional

Bravo Decker (2016), en su trabajo de tesis considera a las pilas de agregado apisonado como una técnica de mejoramiento masivo de suelos que busca reemplazar las antiguas metodologías de mejoramiento de suelos difíciles de llevar a cabo. El trabajo se enfocó para suelos especiales existentes en ciertas zonas de la ciudad de Guayaquil, Ecuador. Con la técnica se busca lograr la densificación de las arenas de baja densidad relativa y la redistribución de esfuerzos de corte bajo esfuerzos cíclicos.

En el presente trabajo de investigación se considera también el uso de las pilas de agregado compactado, pero su principal objetivo es diferente al de Bravo Decker (2016) y es reducir los asentamientos totales y diferenciales por efecto de las cargas a transmitirle al suelo.

Fallas Barrantes (2020), en su tesis de maestría valora el diseño de cuatro soluciones geotécnicas diferentes en Costa Rica. Una de ellas es la cimentación de los aerogeneradores de un parque eólico sobre un suelo mejorado con pilas de grava compactada con la técnica de Geopier, la segunda es una estabilización con pilotaje, la tercera un sostenimiento primario para la construcción de una ventana tipo antena en un túnel y la cuarta, el uso de arcos reticulados de acero para sostener un túnel en forma primaria; las dos últimas obras en rocas blandas. El objetivo general en el caso de las pilas de grava compactada fue “valorar la eficacia técnica y constructiva del uso del método de cimentación intermedia tipo Geopier, en comparación con los métodos tradicionales de cimentación como rellenos de sustitución y pilotes pre excavados”.

Roberts (2017), como parte de su disertación doctoral evaluó los resultados estudio conocido como Ground Improvement Trials para revisar e identificar métodos de mejora de suelos poco profundos que no sólo son efectivos para aumentar la resistencia del suelo a la licuefacción, sino que también son rentables, eficaces y prácticos de construir para estructuras ligeras. Cabe señalar, que el estudio indicado se llevó a cabo en respuesta al desastre ocurrido en Nueva Zelanda causado por niveles extremos de daños inducidos por licuefacción en estructuras con cimientos poco profundos.

Trejos Villalobos (2020), en su trabajo de tesis de maestría evalúa diferentes diseños geotécnicos como solución a cuatro diferentes problemas específicos de suelos registrados en localidades de Costa Rica; entre los diseños evaluados están el sistema que comprende el reforzamiento de suelos arenosos de baja resistencia y potencialmente licuables, con la inclusión de pilas de agregado compactado instaladas con el sistema patentado por Geopier®, para recibir las cargas de la cimentación de un edificio de 15 pisos de altura; el sistema conocido como suelo cosido para mejorar la calzada de una carretera; el pilotaje; y la compactación dinámica.

b) En el ámbito nacional

Cisneros García (2016), en su trabajo de tesis concluyen que “la ingeniería geotécnica actual involucra brindar distintas soluciones a un problema específico, lo cual hace mejorar e innovar nuevas tecnologías para beneficiar económicamente a proyectos donde existan suelos muy compresibles”. Considera que la técnica Geopier implementada y patentada en Estados Unidos que comprende el mejoramiento de suelos mediante la incorporación de pilas de agregado compactado, es una alternativa a las metodologías tradicionales. La técnica se fundamenta “en teorías de la mecánica de suelos clásica aplicadas a las cimentaciones superficiales y profundas, así como presunciones propias del sistema de mejoramiento Geopier”. El trabajo de tesis se enfocó en la propuesta de solución para un centro comercial en la ciudad de Tumbes, donde se registraron diferentes tipos de suelos de baja resistencia.

El sistema de mejoramiento que se analiza en el presente trabajo de tesis considera también el uso de las pilas de agregado compactado, pero para una problemática de suelos diferente.

Plascencia Olivares & Obregón Vilca (2021), evalúan en su tesis la aplicación de diferentes sistemas de mejoramiento de suelos para un proyecto inmobiliario de nueve niveles en el distrito de San Juan Bautista, Loreto. El proyecto se localizaba en un terreno donde se habían registrado suelos de baja resistencia. El objetivo era que el sistema reemplazara a una cimentación costosa con pilotes estructurales considerada inicialmente. Se concluye, luego de la evaluación de diferentes soluciones, que “el sistema de pilas de grava compactada tiene la capacidad de incrementar la presión admisible del suelo, y disminuir los costos de construcción de la cimentación”.

Reyes Morales (2020), revisa varios métodos de diseño de diferentes técnicas de tratamiento del terreno, prestando especial énfasis en las columnas de grava, y evalúa sus respectivos procesos constructivos. Analiza un caso práctico de un puente en la ciudad de Piura, en el que compara el tratamiento de terreno con una

solución con pilotes estructurales, concluyendo que “la alternativa de mejoramiento del terreno resulta mucho más eficiente en términos económicos e ingenieriles”.

Valdiviezo Sandoval (2019), en su trabajo de tesis analizan “el empleo de columnas de grava compacta, en la ciudad de Piura es una solución para mejorar la capacidad portante de los suelos”. Tomaron en cuenta resultados de ensayos de penetración estándar y los resultados de las pruebas de módulo de rigidez llevados a cabo sobre los elementos instalados en el emplazamiento de las bases de cimentación del puente Sánchez Cerro. Luego de comparar las capacidades portantes determinadas antes y después de ejecutado el trabajo de mejoramiento concluye “que se pudo aumentar considerablemente el valor de esta propiedad mediante el uso de columnas de grava compactada”, por lo que considera positiva su utilización.

c) En el ámbito regional

Huamán Quillahuamán (2018), desarrolla una tesis de investigación cuyo objetivo fue “evaluar la relación existente entre la utilización de la Geoestructura de Geopier y el mejoramiento del suelo arcilloso para una edificación en la Avenida Juan Lecaros frente al Estadio Municipal de Puente Piedra”. Consideran la metodología de mejoramiento del terreno con pilas de grava compactada como un tipo de cimentación especial. Toma en cuenta en su investigación resultados de ensayos de penetración estándar, análisis granulométrico por tamizado, límites de consistencia, ensayos de resistencia a la compresión no confinada y pruebas de densidad.

Concluye teniendo en cuenta los resultados de los ensayos obtenidos que la geoestructura de Geopier resulta ser una alternativa segura que permite mejorar las propiedades del suelo y además, su ejecución es rápida y económica. Según sus conclusiones la resistencia del suelo mejora llegando a tener una capacidad de carga de 5 Kg/cm^2 para un asentamiento tolerable de 1 pulgada.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

A lo largo de los años, cuando se han tenido problemas de baja capacidad portante del suelo o se espera la ocurrencia de asentamientos importantes por efecto de las cargas que se desea transmitir al terreno, se han recurrido al uso de cimentaciones profundas con pilotaje o reemplazo de espesores importantes de suelos, independientemente si la capa de suelos de menor resistencia era potente o no.

En el presente trabajo se desarrolla una técnica moderna de mejoramiento de suelos que comprende la incorporación de pilas de grava compactada para reducir los asentamientos diferenciales, la cual resulta económica en comparación de alternativas de solución tradicionales como lo son los reemplazos de suelos y cimentaciones profundas con pilotes. Esta técnica es aplicable a diferentes tipos de obras.

Con respecto a la efectividad del sistema para reducir los asentamientos diferenciales se han llevado diversas pruebas. White, Gaul & Hoevelkamp (2003) llevaron a cabo ensayos de módulo de carga a gran escala de pilas individuales y grupos con el fin de investigar el comportamiento de interacción de pilas de grava compactada instaladas con la patente de Geopier utilizando un proceso de compactación vertical. Los resultados fueron exitosos en cuanto al control del asentamiento y sirvió de base para mejorar las especificaciones de instalación en el perímetro de las áreas tratadas con la finalidad de reducir el asentamiento diferencial global.

Cabe señalar, que las soluciones de refuerzo y mejora de suelos con las pilas de grava o agregado compactado son el resultado de un desarrollo e investigación continuos para proporcionar soluciones de control de asentamientos y cimentaciones en suelos cohesivos blandos y compresibles (Moreno, 2019).

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Suelo de fundación

Crespo Villalaz (2005), define al suelo como “una delgada capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que sobre ella se asientan” (p. 18).

En el suelo se distinguen tres fases constituyentes denominadas sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida está conformada por partículas minerales incluyendo la capa sólida absorbida, la líquida está conformada generalmente por agua, y la fase gaseosa comprende los vapores de diferentes tipos. Las fases líquida y gaseosa rellenan los vacíos entre las partículas que forman la fase sólida. Las relaciones entre pesos y volúmenes de las fases indicadas son importantísimas para el entendimiento y manejo adecuado de las propiedades mecánicas de los suelos. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005, p. 51-54).

Peck, Hanson, & Thornburn (2007) consideran que en “términos generales, la ingeniería de cimentaciones es el arte de elegir, proyectar y construir los elementos que transmiten el peso de una estructura a las capas inferiores de suelo o de roca” (p. 9). Las capas de suelo que reciben las cargas de las estructuras constituyen el suelo de fundación.

2.2.2 Clasificación de suelos

Peck et al. (2007), consideran que, dado que la variedad de suelos es infinita, no es posible crear un sistema universal de clasificación de suelos para poder diferenciarlos sencillamente en grupos o sub grupos. Sin embargo, para fines ingenieriles se han creado diferentes sistemas de clasificación basados en las propiedades físicas de los suelos, como lo son la granulometría y los límites de Atterberg. Entre estos sistemas, se encuentra el sistema unificado de clasificación de suelos que dividen a los suelos de grano grueso y a los suelos de grano fino.

Entre los suelos de grano grueso se encuentran las gravas y las arenas; y en los de grano fino, los limos, las arcillas y los suelos orgánicos (p. 51-56).

El sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) es el considerado en la Norma Técnica Peruana NTP 339.134 (1999). En la siguiente tabla se presenta el cuadro resumen de la norma:

Figura 2.1
Sistema de clasificación de suelos unificado

| DIVISIONES PRINCIPALES | | | Símbolos del grupo | NOMBRES TÍPICOS | IDENTIFICACIÓN DE LABORATORIO | | |
|--|---|---|---|--|---|--|---|
| SUELOS DE GRANO GRUESO Más de la mitad del material retenido en el tamiz número 200 | GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4,76 mm) | Gravas limpias (sin o con pocos finos) | GW | Gravas bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos. | Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica. Según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz número 200). Los suelos de grano grueso se clasifican como sigue: < 5%: GW, GP, SW, SP. > 12%: GM, GC, SM, SC. 5 al 12%: casos límite que requieren usar doble símbolo. | Cu = $D_{60}/D_{10} > 4$ Cc = $(D_{30})^2 / (D_{10}D_{60})$ entre 1 y 3 | |
| | | | GP | Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos. | | No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW. | |
| | | Gravas con finos (apreciable cantidad de finos) | GM | Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo. | | Límites de Afterberg debajo de la línea A o IP < 4. | Encima de la línea A con IP entre 4 y 7 son casos límites que requieren doble símbolo. |
| | | | GC | Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla. | | Límites de Afterberg sobre la línea A con IP > 7. | |
| | ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz número 4 (4,76 mm) | Arenas limpias (pocos o sin finos) | SW | Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos. | | Cu = $D_{60}/D_{10} > 6$ Cc = $(D_{30})^2 / (D_{10}D_{60})$ entre 1 y 3 | |
| | | | SP | Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos. | | Cuando no se cumplen simultáneamente las condiciones para SW. | |
| | | Arenas con finos (apreciable cantidad de finos) | SM | Arenas limosas, mezclas de arena y limo. | | Límites de Afterberg debajo de la línea A o IP < 4. | Los límites situados en la zona rayada con IP entre 4 y 7 son casos intermedios que precisan doble s. |
| | | | SC | Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla. | | Límites de Afterberg sobre la línea A con IP > 7. | |
| SUELOS DE GRANO FINO Más de la mitad del material pasa por el tamiz número 200 | Limos y arcillas: Limite líquido menor de 50 | ML | Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plasticidad. | G = Grava, S = Arena, O = Suelo Orgánico, P = Turba, M = Limo, C = Arcilla, W = Bien Graduado, P = Mal Graduado, L = Baja comprensibilidad, H = Alta comprensibilidad. | <p>Gráfica de plasticidad del USCS</p> | | |
| | | CL | Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcilla, con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas. | | | | |
| | | OL | Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad. | | | | |
| | Limos y arcillas: Limite líquido mayor de 50 | MH | Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o distomeas, limos elásticos. | | | | |
| | | CH | Arcillas inorgánicas de plasticidad alta. | | | | |
| | | OH | Arcillas orgánicas de plasticidad media elevada, limos orgánicos | | | | |
| Suelos muy orgánicos | | PT | Turba y otros suelos de alto contenido orgánico | | | | |

Nota. Referencia NTP 339.134 (1999)

2.2.3 Resistencia al corte

Braja (2015), considera que “la resistencia cortante de un suelo es la resistencia interna por unidad de área que la masa de suelo puede ofrecer a la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano en su interior” (p. 228).

Suárez (2009), obtiene los parámetros de resistencia al corte a partir de la representación gráfica de la ecuación de Coulomb. Estos parámetros son el ángulo de fricción interna y la cohesión, los cuales se consideran como propiedades intrínsecas del suelo. (p.75). Suárez define al ángulo de fricción como “la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física” (p. 76). Asimismo, define la cohesión como “una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en la mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación entre las partículas, mientras que en la física, este término se utiliza para representar la resistencia a la tensión” (p. 77).

2.2.4 Asentamientos

Pulido-Chavez & Rueda-Melo (2019), señalan que “en geotecnia, asiento o asentamiento es un movimiento descendente vertical del terreno (subsistencia) debido a la aplicación de cargas que causan cambios en las tensiones dentro del terreno”.

2.2.5 Cálculo de asentamientos en un suelo granular

Para determinar los asentamientos ocasionados por las cargas sobre un suelo granular puede utilizarse la expresión de Terzaghi, Peck, & Mesri, (1996), que considera que la presión admisible por asentamientos es función de la densidad relativa de los suelos dentro de la profundidad activa, del ancho de la cimentación (B), del asentamiento máximo permisible, de la forma de la cimentación y de la posición de la napa freática. La formulación de Terzaghi cuantifica la densidad relativa de los suelos con los valores de N resultantes del ensayo de penetración estándar.

La formulación de Terzaghi et al. (1996) puede expresarse de la siguiente forma:

$$q_a = 0,096 \frac{(N_{60})^{1,4}}{B^{0,75}} f_{\delta} f_{NF} f_F$$

Donde:

- q_a = Presión admisible en Kg/cm² (que en este caso sería la presión aplicada)
- N_{60} = $N C_E C_B C_R C_S$
- N = No de golpes obtenido en el ensayo SPT dentro del espesor $B^{0,75}$ profundidad activa de cimentación)
- C_E = Factor de corrección por energía del martillo utilizado para ejecutar los ensayos SPT
- C_B = Factor de corrección por el diámetro de la perforación, $C_B = 1$ para $2,5" < d_p < 4,5"$
- C_R = Factor de corrección por longitud de varillas de perforación, $C_R = 0,75$ para $1_b < 4$ m, $C_R = 0,85$ para $4 < 1_b < 6$ m, $C_R = 0,95$ para $6 < 1_b < 10$ m y $C_R = 1$ para 10 m $< 1_b$
- C_S = Factor de corrección por muestreador, con o sin revestimiento.
- B = Ancho o diámetro de la cimentación en m.
- f_{δ} = Factor de corrección por asentamiento, $f_{\delta} = \delta / 2,5$ cm, $f_{\delta} = 1$ para $\delta = 2,5$ cm
- f_{NF} = Factor de corrección por posición del nivel freático
- f_F = Factor de corrección por forma $f_F = ((L/B + 0,25) / 1,25 L/B)^2$, $f_F = 0,64$ para $L/B = \infty$ y $f_F = 1$ para $L/B = 1$, siendo L = largo de la zapata y B = ancho de la cimentación.

Considerando que $f_{\delta} = \delta / 2,5$ cm, para determinar el asentamiento ocasionado por una carga q , puede despejarse δ en la ecuación indicada y considerar la presión admisible q_a como la carga aplicada q . Así se obtiene:

$$\delta = \frac{2.5 q B^{0,75}}{0,096 (N_{60})^2 f_{NF} f_F}$$

Donde:

| | | |
|----------|---|--|
| δ | = | Asentamiento esperado en cm |
| q | = | Carga repartida aplicada en Kg/cm ² |
| N_{60} | = | $N C_E C_B C_R C_S$ |
| B | = | Ancho de la cimentación en metros |

2.2.6 Mejoramiento del terreno

Soletanche Bachi (s.f.) en su guía técnica señala que:

las técnicas de mejoramiento de suelos implican la modificación de las propiedades de un suelo por efecto de una acción física, ya sea como consecuencia de la inclusión de un elemento más rígido, por vibraciones, por efecto de compactación dinámica, entre otros. La finalidad del mejoramiento es incrementar la resistencia al corte del suelo, reducir los posibles asentamientos, tanto totales como diferenciales, y acelerarlos en algunos tipos de suelos, mitigar el potencial de licuefacción en caso de sismo o vibraciones importantes. El tipo de técnica aplicable estará en función de las características particulares del suelo que se desea mejorar. (p.103)

Bielza (1999) señala que existen diferentes métodos de mejoramiento de suelos que se pueden llevar a cabo, tomando en cuenta aspectos tradicionales, como nuevas tecnologías (p. 17). En su libro propone y desarrolla diversos métodos de mejora y su posible aplicabilidad según tipo de suelo (gravas, arenas, limos y arcillas), propiedades a mejorar (capacidad de carga, deformabilidad, permeabilidad) y la profundidad a la que el tratamiento es eficaz.

2.2.7 Mejoramiento del terreno con pilas de agregado compactado

Según Plascencia Olivares & Obregón Vilca (2021) “el sistema de pilas de agregado compactado no debe ser entendido como un sistema de cimentación, sino más bien como un sistema de reforzamiento de suelo”; al incluir las pilas en el suelo, que son elementos más rígidos que el suelo circundante, se modifican las propiedades mecánicas del suelo y mejora su capacidad portante, ya que además del hecho de tener las pilas como parte del suelo, durante su instalación se compacta lateralmente el suelo. Por lo indicado, el suelo que rodea las pilas adquiere una mayor capacidad de soporte que la que tenía originalmente.

El sistema de mejoramiento con pilas de grava compactada se originó en Iowa, Estados Unidos, como una alternativa al método de mejoramiento de suelos consistente en el reemplazo de suelos, que implicaba la excavación y retiro del material inadecuado y reemplazo por capas de material seleccionado, colocado y compactado (Fox & Cowell, 1998, p.1).

2.2.8 Metodología de diseño de pilas de agregado compactado

El diseño de pilas de agregado compactado se sustenta en un análisis de asentamientos de dos capas, similar al propuesto por Lawton y otros (1994), para el diseño de refuerzo de suelos.

Los asentamientos dentro de la capa superior, que corresponde a la zona que estará reforzada con las pilas de agregado compactado, se calculan usando el método de módulo ponderado que toma en cuenta la rigidez de los elementos colocados, la rigidez del suelo circundante, y el área de cobertura de los elementos, debajo de la franja que recibirá las cargas de los racks en el presente caso.

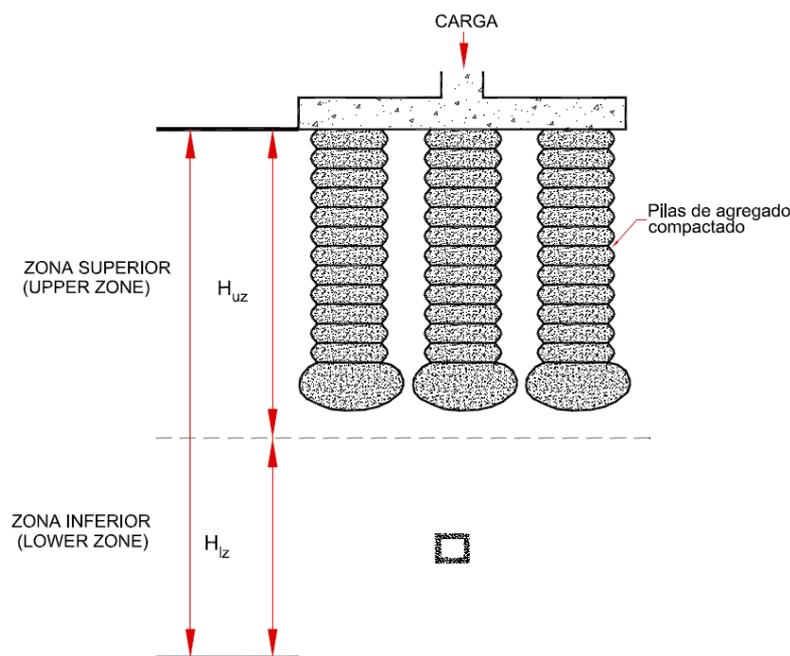
Los asentamientos dentro de la parte inferior que corresponde al suelo natural bajo la capa de suelo reforzada, que es la que recibe los mayores esfuerzos, se calculan usando métodos geotécnicos convencionales.

El objetivo en el presente caso es controlar y reducir la ocurrencia de asentamientos hasta satisfacer los criterios específicos del proyecto de racks acumulativos a instalar dentro de la nave de secos.

Los asentamientos totales bajo las cimentaciones se estiman sumando el asentamiento en la zona superior del suelo reforzado con las pilas de agregado compactado y el asentamiento de la zona inferior, bajo el fondo de las pilas de agregado compactado. En la siguiente Figura se muestra un esquema típico de refuerzo bajo cimentaciones.

Figura 2.2

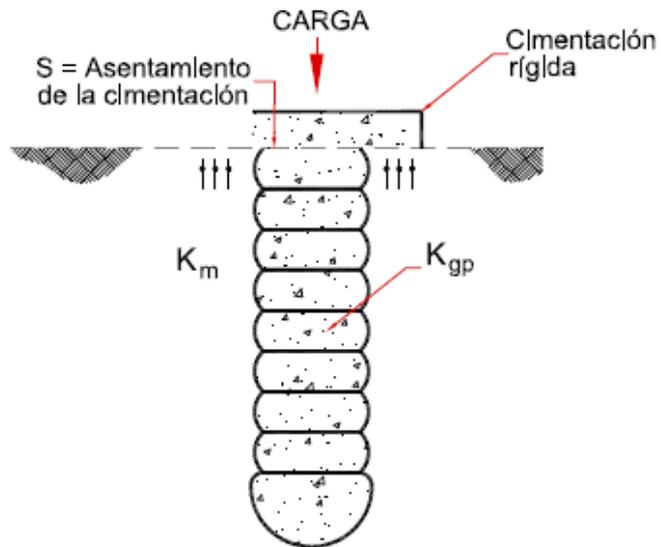
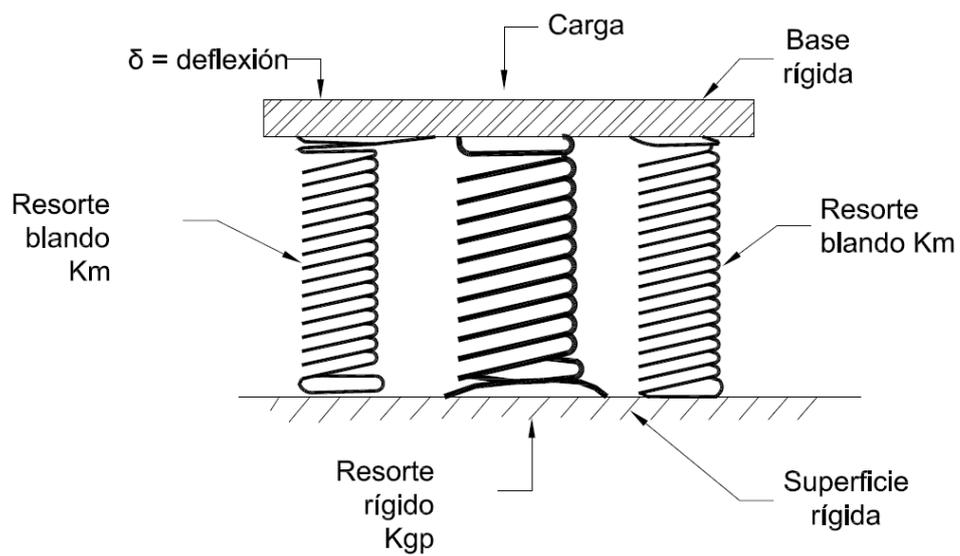
Modelo de dos zonas



Nota. Adaptado de Fox & Cowell (1998)

2.2.9 Cálculo del asentamiento en la zona superior mediante la analogía de resortes

El procedimiento para calcular los asentamientos en la zona superior se basa en una analogía de resortes (Lawton y Fox 1994, Wissmann y Fox 2000) como se muestra en la Figura 2.4.

Figura 2.3*Esquema de pila de agregado compactado**Nota. Adaptado de Fox & Cowell (1998)***Figura 2.4***Analogía de resortes de diseño**Nota. Adaptado de Fox & Cowell (1998)*

Las pilas de agregado compactado se comportan como resortes rígidos, mientras que la matriz de suelo natural circundante entre las pilas actúa como resortes blandos o menos rígidos. Los esfuerzos aplicados al suelo reforzado se distribuyen de acuerdo con la rigidez relativa entre la pila y el suelo (R_s) y la razón de área de reemplazo o área de cobertura de las pilas (R_a).

En el presente caso la fuerza Q que se aplica se puede expresar como el producto entre el esfuerzo de contacto promedio y el área de la losa que interviene en la transmisión de cargas.

La resistencia del suelo mejorado corresponderá, por lo tanto, a la resistencia brindada por las pilas de agregado compactado más la resistencia brindada por los suelos entre las pilas de agregado compactado, tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$Q = q A = Q_g + Q_m = q_g A_g + q_m A_m \quad (1)$$

Donde:

| | | |
|-------|---|---|
| Q | = | Carga total aplicada |
| q | = | Carga repartida promedio |
| A | = | Área de la cimentación |
| Q_g | = | Resistencia brindada por las pilas |
| Q_m | = | Resistencia brindada por la matriz de suelo |
| q_g | = | Esfuerzo aplicado en la parte superior de las pilas |
| q_m | = | Esfuerzo aplicado al suelo natural entre las pilas |
| A_g | = | Área de las pilas debajo de la cimentación |
| A_m | = | Área de la matriz de suelo circundante |

Se considera que la cimentación, en el caso de análisis sería la losa de concreto, es rígida en relación con el suelo mejorado de apoyo, por lo que el asentamiento de la pila de agregado compactado será igual al asentamiento de la matriz de suelo circundante. En consecuencia, el asentamiento de la base de cimentación se puede expresar en función de la rigidez de las pilas de agregado

compactado y de la rigidez de la matriz de suelo circundante, como se muestra en la siguiente expresión:

$$S_{uz} = \frac{qg}{k_g} = \frac{qm}{k_m}$$

Donde:

| | | |
|----------|---|---|
| S_{uz} | = | Asentamiento de la cimentación |
| k_g | = | Rigidez de las pilas |
| k_s | = | Rigidez de la matriz de suelo circundante |

Considerando que el esfuerzo que recibe la parte superior de las pilas de agregado compactado está en función del esfuerzo promedio transmitido por la losa al subsuelo, así como de la relación entre la rigidez de las pilas instaladas y la rigidez del suelo circundante y de la relación entre las áreas transversales de las pilas y el área de la sección de la losa considerada, se tiene:

$$qg = q \frac{R_s}{R_a R_s - R_a + 1}$$

Donde:

| | | |
|-------|---|--|
| qg | = | Esfuerzo que recibe la parte superior de las pilas |
| q | = | Esfuerzo promedio transmitido por la losa al subsuelo |
| R_s | = | Relación de rigideces = kg/km |
| R_a | = | Relación entre las áreas transversales de las pilas y el área de la sección de la losa considerada de las pilas y el área de la sección de la losa considerada |

El módulo de rigidez k_g se define como la relación entre el esfuerzo aplicado en la parte superior de las pilas y la deformación vertical resultante. Para fines de diseño, se puede estimar la constante de rigidez de la pila usando una base de datos establecida de pruebas de módulo anteriores en suelos de características similares. Posteriormente a la instalación de las pilas, debe verificarse con una o varias

pruebas de módulo in situ, que efectivamente se obtenga una constante de rigidez igual o mayor que la estimada para fines de cálculo.

Por lo indicado, se tiene que el asentamiento en la zona superior de suelo reforzado será la relación entre el esfuerzo aplicado en la parte superior de la pila y su propio módulo de rigidez, así se tiene:

$$S_{uz} = \frac{qg}{kg}$$

Donde:

| | | |
|----------|---|--|
| S_{uz} | = | Asentamiento en la zona superior de suelo reforzado |
| qg | = | Esfuerzo aplicado en el tope de la pila de agregado compactado |
| kg | = | Rigidez de la pila de agregado compactado |

2.2.10 Cálculo de asentamiento en la zona superior empleando la metodología de módulo elástico compuesto

Los asentamientos de cimentaciones apoyadas sobre suelos heterogéneos también pueden ser determinados usando una metodología del módulo elástico compuesto, donde el asentamiento en la zona superior reforzada (zona de suelo reforzado usando el sistema de pilas de agregado compactado) se estima usando formulaciones convencionales para cálculo de asentamientos. En el presente caso se considerará la metodología de Terzaghi et al. (1996), que considera la siguiente expresión:

$$S_{uz} = \frac{q \text{ Iz H}}{E_{comp}}$$

Donde:

| | | |
|----------|---|---|
| S_{uz} | = | Asentamiento en la zona superior de suelo reforzado |
| q | = | Presión aplicada promedio (carga repartida) |

| | | |
|------------|---|---|
| I_z | = | Factor de influencia a profundidades del suelo compresible |
| H | = | Espesor de la capa compresible |
| E_{comp} | = | Módulo elástico compuesto dentro de la zona superior reforzada con pilas de agregado compactado |

El módulo elástico compuesto se puede determinar utilizando un promedio ponderado de los valores del módulo elástico de las pilas de agregado compactado y módulo elástico del suelo matriz usando la siguiente expresión:

$$E_{comp} = E_g R_a + E_m (1 - R_a)$$

Donde:

| | | |
|------------|---|----------------------------------|
| E_{comp} | = | Módulo elástico compuesto |
| E_g | = | Módulo elástico de las pilas |
| R_a | = | Razón de área de reemplazo |
| E_m | = | Módulo elástico del suelo matriz |

El valor del módulo elástico de las pilas de agregado compactado es estimado en proporción al módulo de rigidez del elemento y debe ser verificado in situ mediante pruebas de módulo.

El módulo elástico del suelo matriz, esto es el suelo entre las pilas de agregado compactado, puede determinarse utilizando correlaciones empíricas con la resistencia al corte no drenado del suelo, a partir de los golpes del ensayo de penetración estándar (SPT), a partir de la resistencia obtenida mediante conos estáticos (CPT) o a partir de los resultados de ensayos de consolidación en el caso de suelos cohesivos.

2.2.11 Cálculo del asentamiento en la zona inferior

a) Cálculo de asentamiento elástico (suelos granulares)

En suelos granulares arenosos bajo la capa de suelos reforzada, los asentamientos se pueden estimar usando las teorías convencionales de elasticidad (Terzaghi y Peck, 1967) con valores de módulo de elasticidad determinados a partir de correlaciones con resultados de pruebas de laboratorio o pruebas in situ.

Esta metodología considera que los esfuerzos inducidos en la zona inferior se pueden estimar usando soluciones para una cimentación apoyada en un medio elástico semi infinito. Esta suposición se considera conservadora.

Para determinar los asentamientos se puede usar la siguiente expresión:

$$S_{lz} = \frac{q I_z H_{lz}}{E_s}$$

Donde:

| | | |
|----------|---|---|
| S_{lz} | = | Asentamiento en la zona inferior |
| q | = | Esfuerzo de contacto en la base de la cimentación |
| I | = | Factor de influencia de esfuerzos |
| H_{lz} | = | Espesor de suelos considerado |
| E_s | = | Módulo de elasticidad del suelo |

b) Cálculo de asentamiento por consolidación (suelos finos)

El asentamiento de las capas de arcilla preconsolidada debajo de la capa reforzada con pilas de agregado compactado, se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\delta = \frac{H C_s}{1 + e} \log \left(\frac{\sigma'_o + \Delta \sigma}{\sigma'_o} \right)$$

Donde:

- δ = Asentamiento
- H = Espesor de la capa
- C_s = Índice de recompresión de las arcillas
- σ'_o = Presión de tapada
- $\Delta \sigma$ = Incremento de carga
- e = Relación de vacíos

El estado de preconsolidación de las arcillas se puede verificar usando el procedimiento propuesto por Terzaghi et al. (1996) en el que utilizando la ecuación propuesta por Skempton se puede determinar si una arcilla o un limo es preconsolidado. La ecuación es la siguiente:

$$c_u/\sigma'_o \text{ (NC)} = 0,11 + 0,0037 \text{ IP}$$

Donde:

- c_u = Cohesión en condiciones no drenadas
 - σ'_o = Presión de tapada
 - IP = Índice de plasticidad
- $c_u/\sigma'_o \text{ (NC)}$ = Valor correspondiente a una arcilla normalmente consolidada

2.3 DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS

2.3.1 Propiedades mecánicas de los suelos

Las propiedades mecánicas del suelo son las que determinan el comportamiento suelo al variar su estado de tensiones y dependen de los parámetros de resistencia al corte. Juárez Badillo & Rico Rodriguez, (1973) indican “que se refieren especialmente a su resistencia y compresibilidad, a sus condiciones hidráulica, etc.” (p. 188).

2.3.2 Asentamiento diferencial

Alva (2012), considera que el asentamiento diferencial como la diferencia de asentamientos (deformación vertical) entre dos puntos. (p. 77).

Según Alva, tiene más importancia el asentamiento diferencial que el asentamiento total, a pesar de que es más complicado estimar el asentamiento diferencial, lo cual se debe a que la magnitud del diferencial no solo depende del suelo, sino también de las características y cargas de la estructura de cimentación (p. 60-61).

2.3.3 Pila de agregado compactado

La pila de agregado compactado es un elemento no estructural que se emplea para el refuerzo de suelos de baja resistencia, ya sean éstos arenas muy sueltas a medianamente densas, arcillas y limos de baja a mediana consistencia, rellenos no controlados y también, suelos bajo el nivel freático. Estos elementos son construidos empleando alta energía vertical de impacto sobre capas de agregado compactado, generalmente gravas de 1/2 a 2 pulgadas de tamaño máximo con un porcentaje de finos menor de 10% en peso. Estos elementos al tener mayor rigidez que el suelo circundante donde se introduce, logran densificarlo por el proceso de instalación utilizado (en el caso de las arenas), general mayor control de asentamientos y finalmente, con su incorporación en el subsuelo se logra tener una capacidad de carga mejorada. (Fox & Cowell, 1998, p.1).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 HIPÓTESIS

3.1.1 Hipótesis general

La incorporación de pilas de grava compactada mejora el terreno de fundación del almacén del CD ubicado en Huachipa 2022 para reducir los asentamientos diferenciales.

3.1.2 Hipótesis específicas

Las hipótesis específicas son:

- ✓ Las metodologías de mejoramiento de suelos reducen los factores de riesgo por los asentamientos diferenciales en el almacén del CD.
- ✓ La incorporación de pilas de grava compactada en el suelo de fundación del almacén del CD previene la ocurrencia de asentamientos diferenciales.

3.2 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.2.1 Identificación de las variables

- Variable dependiente: Suelo de fundación
- Variable independiente: pilas de grava compactada

3.2.2 Indicadores

- Indicadores de la variable dependiente: Suelo de fundación
Dimensión: Tipo de suelo
 - ✓ Granulometría – unidad de medida: tamaño del grano
 - ✓ Límites de Atterberg – unidad de medida: valores de LL y LPDimensión: N (ensayo de penetración estándar – SPT)
 - ✓ Número de golpes – unidad de medida: #

Dimensión: parámetros de resistencia al corte

✓ Ángulo de fricción interna – Unidad de medida: grados

✓ Cohesión - Unidad de medida: Valores en Kg/cm²

- Indicadores de la variable independiente: pilas de grava compactada

Dimensión: tamaño de las pilas

✓ Longitud – unidad de medida: m

✓ Diámetro – unidad de medida: m

Dimensión: espaciamiento

✓ Distancia entre centros. Unidad de medida: m

Tabla 3.1

Variables, dimensiones e indicadores

| Variables | Dimensiones | Indicadores | Unidad de medida | Valor final | Tipo de variable |
|---|--|---------------------------------------|-----------------------------|-------------|-----------------------|
| Variable dependiente Suelo de fundación | Tipo de suelo | Granulometría Límites de Atterberg | Tamaño grano Plasticidad | SUCS | Cualitativa nominal |
| | N (ensayo de penetración estándar SPT) | Número de golpes | # | | Cuantitativa discreta |
| | Parámetros de resistencia al corte | Ángulo de fricción interna | (°) | | Cuantitativa Continua |
| | | Cohesión | Kg/cm ² | | Cuantitativa Continua |
| Variable independiente Pilas de grava compactada | Tamaño de las pilas | Longitud | m | | Cuantitativa Continua |
| | | Diámetro | m | | Cuantitativa continua |
| | Espaciamiento | Distancia entre centros | m | | Cuantitativa continua |

3.3 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación es aplicada con un enfoque **cuantitativo**.

Se considera el enfoque cuantitativo porque “utiliza la recolección de datos y el análisis de datos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis” Ñaupas, Mejía, Novoa, & Villagomez (2014). Además, según dichos autores “tiene que ver con la medición y el uso de magnitudes” entre otros (p.140).

3.4 NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El nivel de investigación es **aplicativo**.

La investigación es aplicada por cuanto “busca resolver un problema” Hernández, Fernández, & Baptista, (2014, p. XXIV). De acuerdo con Valderrama (2013), este tipo de investigación “busca conocer que hacer, actuar, construir y modificar, le preocupa la aplicación inmediata sobre la realidad concreta”. (p.39

3.5 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño es **no experimental**.

Se considera no experimental basándose en la definición dada por Hernández, Fernández, & Baptista, (2014), que señalan que este diseño “podría definirse como la investigación que se realiza sin manipular deliberadamente variables” (p.152). En el presente caso si bien se han variado indicadores de la variable independiente que son las pilas de grava compactada para obtener el diseño del refuerzo, no se ha modificado su composición interna.

3.6 ÁMBITO DE LA INVESTIGACIÓN

El centro de distribución (CD) está ubicado en la asociación El Bosque, al pie de unos cerros considerados como zona arqueológica del Instituto Nacional de Cultura, en la localidad de Huachipa, distrito de Lurigancho – Chosica, provincia y departamento de Lima. El acceso es desde la avenida Chosica.

3.7 POBLACIÓN Y MUESTRA

3.7.1 Unidad de estudio

La unidad de estudio es un almacén del Centro de distribución, denominado nave de secos, el cual albergará racks acumulativos de 20 m de altura.

3.7.2 Población

Según Pineda et al (1994), "la población puede estar constituida por personas, animales, registros médicos, los nacimientos, las muestras de laboratorio, los accidentes viales entre otros" (citado en López, 2004). En el presente caso, se puede considerar a la población como el área de terreno que ocupará el nuevo almacén del Centro de Distribución ubicado en Huachipa, Lurigancho – Chosica, Lima, que es de aproximadamente 24000 m².

3.7.3 Muestra

Teniendo en cuenta que se trata de una extensión de terreno para determinar la cantidad de puntos de investigación se considera lo estipulado en la Norma Técnica de Edificación E050: Suelos y Cimentaciones (2018) en cuanto al número de puntos de investigación. Para una extensión de terreno de aproximadamente 24000 m² y teniendo en cuenta que de acuerdo a la norma indicada la edificación prevista se puede clasificar como tipo III, corresponde ejecutar un punto de investigación cada 900 m², esto es 27 puntos.

Con respecto a la cantidad de pilas de grava a considerar para el mejoramiento del terreno, en la propuesta de solución que se consideran 4 455 distribuidas en toda el área del almacén.

3.8 RECOLECCIÓN DE DATOS

3.8.1 Procedimiento

Para evaluar las características y propiedades del terreno de fundación se ha contado con la información de 28 puntos de investigación, 21 perforaciones de 13,45 a 16,45 m de profundidad con ensayos de penetración estándar SPT

espaciados cada 1 m, 5 calicatas y 2 auscultaciones con cono de Peck hasta el rechazo.

Para fines de evaluación y considerando que los suelos predominantes son arenosos, para determinar los asentamientos esperados se utilizará la metodología de Terzaghi et al. (1996), con base a los valores de N obtenidos en los ensayos de penetración estándar dentro del bulbo de presiones del área cargada. Por conveniencia, se ha utilizado sólo la información de las perforaciones.

Cabe señalar, que previamente se ha verificado la clasificación de suelos observada en campo llevando a cabo ensayos de laboratorio en muestras representativas (análisis granulométrico por tamizado y límites de Atterberg).

3.8.2 Técnicas de recolección de datos

Como se ha indicado los datos primarios de los suelos se han obtenido a partir de perforaciones en las cuales se llevarán a cabo ensayos de penetración estándar SPT espaciados cada 1 m. En las perforaciones se ha llevado a cabo el registro minucioso de las características de los suelos que constituyen cada estrato del subsuelo y su clasificación visual según los procedimientos del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. Se considera este registro como una técnica de observación y se adjunta el formato utilizado para la toma de datos de las perforaciones en campo en los apéndices.

La clasificación visual se ha verificado en el laboratorio, para lo cual en muestras representativas entre las obtenidas en el penetrómetro del ensayo de penetración estándar se llevaron a cabo ensayos de clasificación: análisis granulométricos por tamizado y límites de Atterberg.

De las perforaciones adicionalmente se obtuvieron muestras inalteradas de los suelos cohesivos (limos y arcillas que se encuentren), para ejecutar ensayos de resistencia a la compresión no confinada, pesos unitarios y contenido de humedad, los cuales permitieron determinar los parámetros de resistencia al corte de dichos suelos.

Se incluyen en los apéndices los formatos de registro de datos de laboratorio de los ensayos indicados.

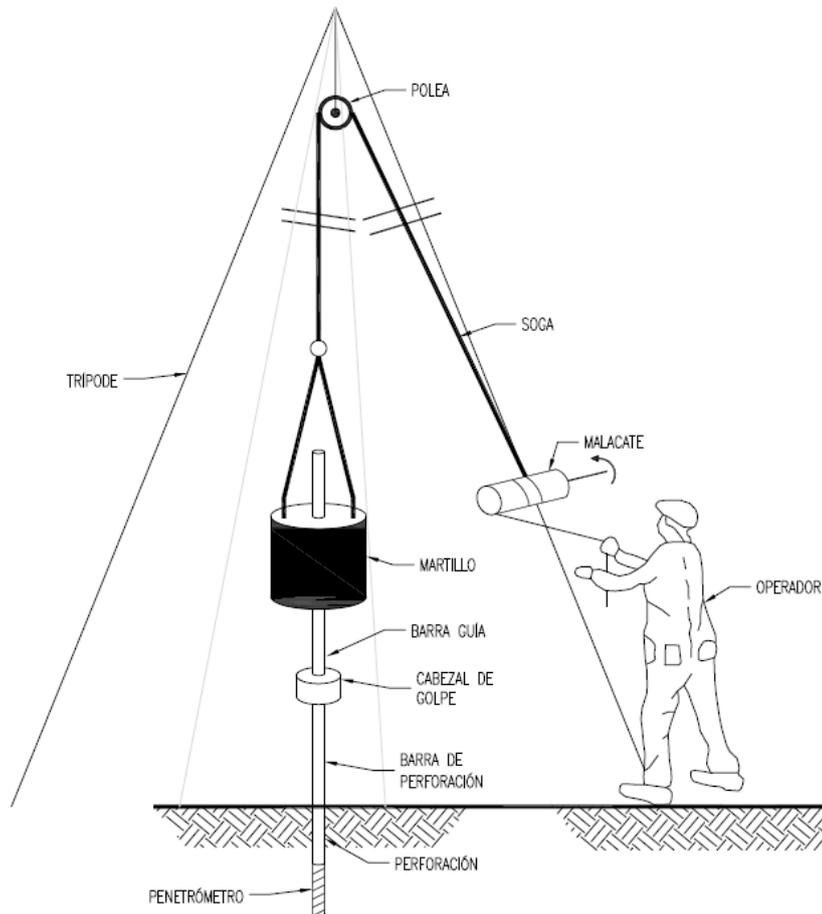
3.8.3 Instrumentos

Se pueden considerar como instrumentos en el presente caso a los equipos utilizados tanto en el campo como el laboratorio para obtener los parámetros físicos y mecánicos de los suelos.

En el campo se ha utilizado el equipo para ejecutar el ensayo de penetración estándar SPT cada 1 m de profundidad en las perforaciones, el cual consta básicamente de lo siguiente:

- ✓ Trípode de 6 m de altura
- ✓ Barras de perforación de acero AW
- ✓ Martillo de 140 libras
- ✓ Barra guía
- ✓ Cabezal de golpe
- ✓ Malacate (motor para elevar y dejar caer el martillo libremente)
- ✓ Penetrómetro
- ✓ Soga
- ✓ Polea

Figura 3.1
Esquema de equipo de penetración estándar SPT



Con respecto a los ensayos de laboratorio, para determinar las características físicas de los suelos se llevaron a cabo ensayos de granulometría por tamizado, límites de Atterberg, contenido de humedad, pesos unitarios y resistencia a la compresión no confinada.

Los instrumentos utilizados en el laboratorio son:

a) Para la ejecución del análisis granulométrico por tamizado

- ✓ Horno para el secado
- ✓ Juego de tamices de sección cuadrada de abertura entre 3 pulgadas y # 200
- ✓ Balanzas de sensibilidad 0,1 g
- ✓ Recipientes
- ✓ Cepillo y brocha

Figura 3.2

Instrumentos para granulometría por tamizado



b) Para la ejecución de los límites de Atterberg

- ✓ Horno para el secado
- ✓ Copa de Casagrande
- ✓ Acanalador
- ✓ Espátula
- ✓ Balanzas de sensibilidad 0,1 y 0,01 g
- ✓ Vidrio esmerilado
- ✓ Recipientes y accesorios

Figura 3.3

Instrumentos para ejecutar límite líquido



Figura 3.4

Instrumentos para ejecutar límite plástico



c) Para la ejecución del ensayo de resistencia la compresión no confinada y pesos unitarios

- ✓ Aparato de compresión
- ✓ Deformímetro
- ✓ Dial de carga
- ✓ Instrumentos de medición
- ✓ Cronómetro
- ✓ Balanza
- ✓ Equipos varios

Figura 3.5
Equipo de compresión no confinada



CAPÍTULO IV

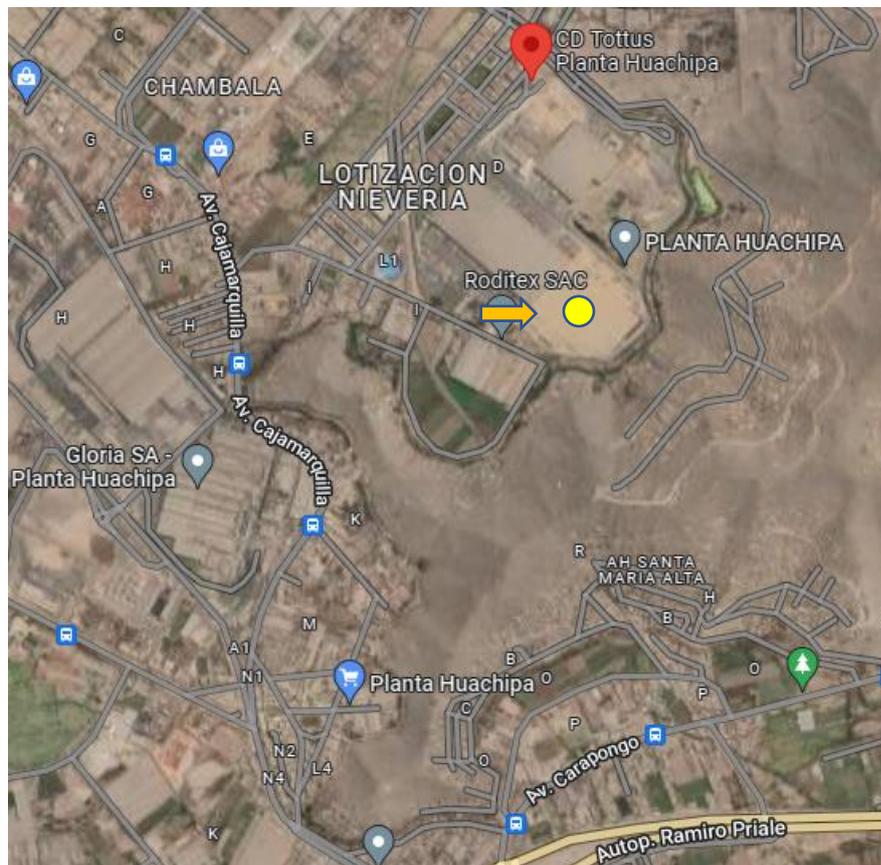
RESULTADOS

4.1 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO

En el terreno donde se prevé construir la nave de secos existe una plataforma de forma alargada de 134,00 m de ancho y 186.20 m de largo, la cual presenta una superficie sensiblemente plana conformada mediante cortes. Esta superficie se encuentra al mismo nivel del piso de la nave de secos colindante existente (NPT cota 385,50 m) y aproximadamente 1,20 m sobre el nivel de la superficie de las vías y patio de maniobras de camiones existentes al Norte y Sur de la plataforma.

Figura 4.1

Vista donde se indica la ubicación de la zona donde se ubicará la nueva nave de secos



Considerando que el terreno tiene una extensión de aproximadamente 24000 m² y que según lo estipulado en la Norma Técnica de Edificación E050: Suelos y Cimentaciones (2018) en cuanto al número de puntos de investigación, debe ejecutarse para el tipo de edificación prevista un sondeo por cada 900 m², en el presente caso era necesario ejecutar como mínimo 27 puntos de investigación.

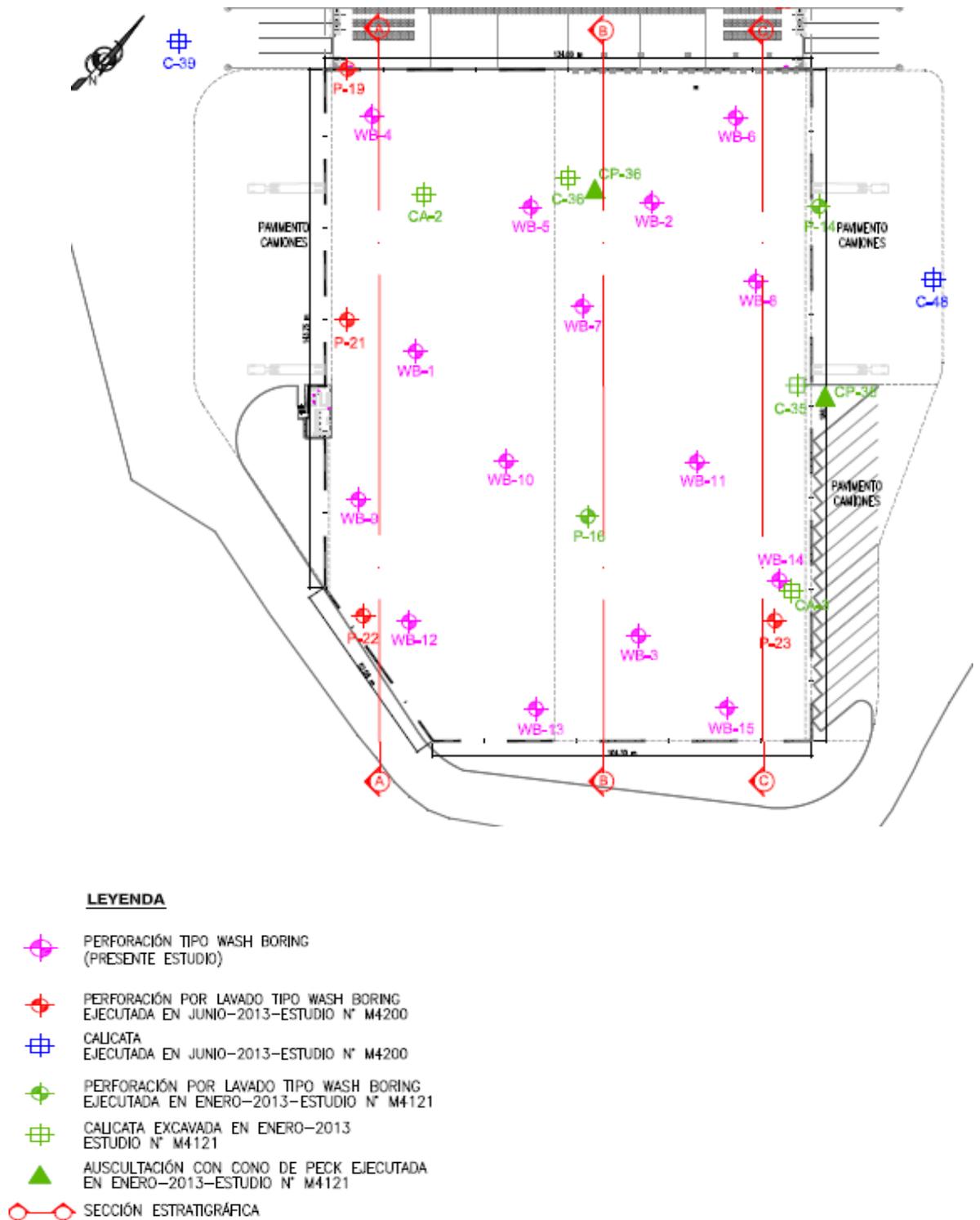
Para evaluar las características y propiedades del terreno de fundación se cuenta con la información de 28 puntos de investigación, 21 perforaciones de 13,45 a 18,45 m de profundidad con ensayos de penetración estándar SPT espaciados cada 1 m, 5 calicatas y 2 auscultaciones con cono de Peck hasta el rechazo. Estos sondeos se llevaron a cabo en 3 etapas. Las dos primeras etapas se ejecutaron previo a la conformación de la plataforma; y la tercera etapa se ejecutó luego de los trabajos de plataformado.

La primera etapa comprendió 2 perforaciones por el método de lavado conocido como wash boring, de 15,45 m de profundidad, denominadas P-14 y P-16. Además como parte de esta etapa se excavaron manualmente 4 calicatas hasta profundidades comprendidas entre 2,00 y 3,00 m, denominadas C-35, C-36, CA-2 y CA-3; y se ejecutaron 2 auscultaciones dinámicas con cono de Peck denominadas CP-35 y CP-36, las cuales alcanzaron rechazo a profundidades iguales a 15,00 y 14,10 m, respectivamente.

La segunda etapa incluyó 4 perforaciones por el método de lavado (wash boring) de profundidades comprendidas entre 12,45 y 18,45 m, denominadas P-19, y P-21 a P-23.

La tercera etapa que se llevó a cabo luego de efectuar los cortes en el terreno comprendió 15 perforaciones por el método de lavado (wash boring), las cuales alcanzaron profundidades comprendidas entre 13,45 a 16,45 m respecto al nivel de la superficie del terreno. Estas perforaciones se denominaron WB-1 a WB-15.

Figura 4.2
Ubicación de las perforaciones efectuadas



Nota. Referencia *Martinelli (2021)*

Figura 4.3

Vista donde se aprecia la ejecución de una de las perforaciones cerca de la nave colindante existente



Nota. Referencia Martinelli (2021)

Figura 4.4

Ejecución de un ensayo de penetración estándar en la perforación P-21



Nota. Referencia Martinelli (2021)

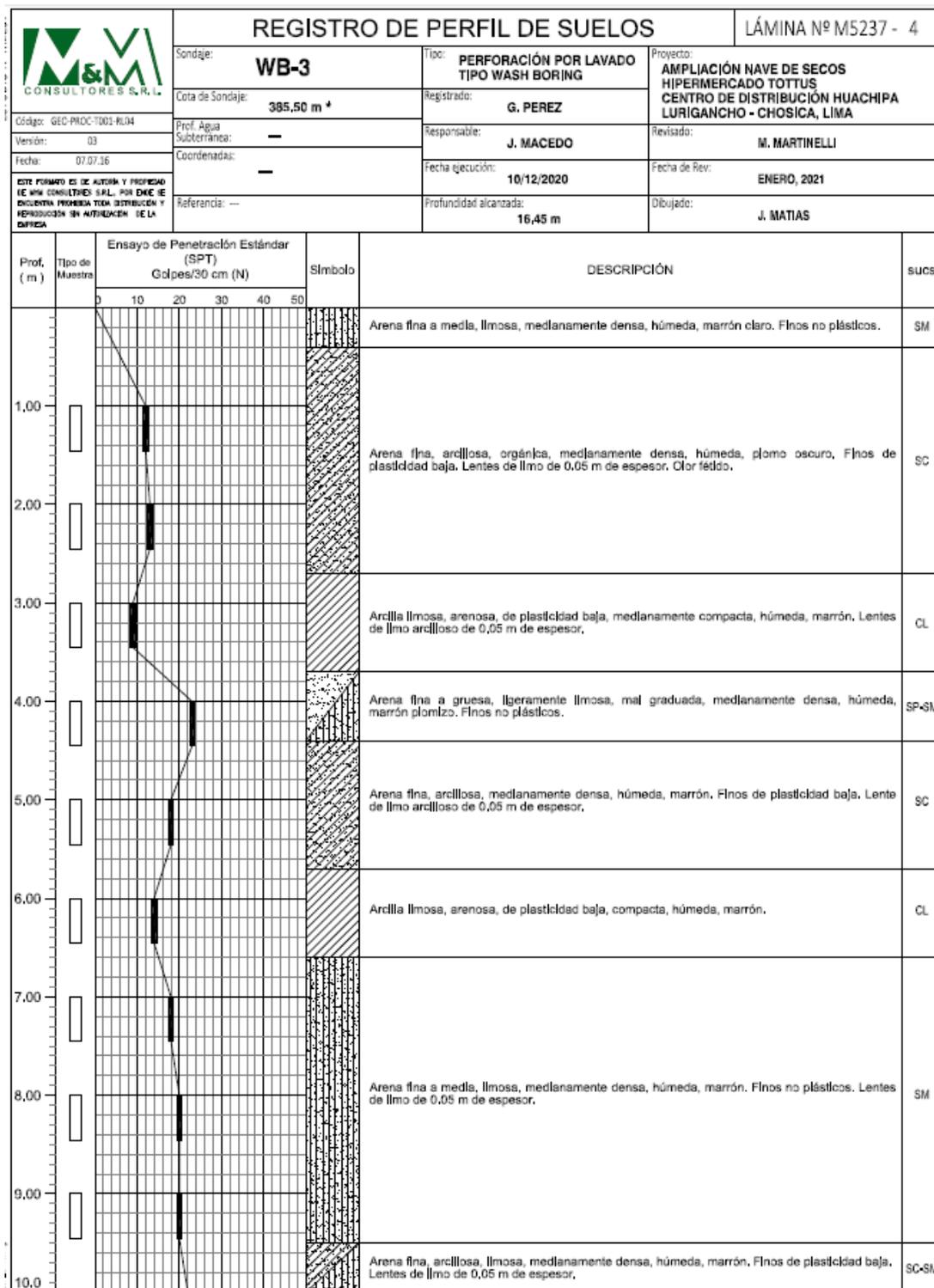
En todas las perforaciones se realizó un perfilaje minucioso, se registraron las características de cada estrato de suelos y se clasificaron visualmente los suelos de acuerdo con los procedimientos del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos; asimismo, se extrajeron muestras alteradas e inalteradas representativas, las cuales fueron remitidas al laboratorio debidamente protegidas e identificadas, para su verificación y ejecución de ensayos.

Para fines de análisis y cálculo de parámetros de cimentación y asentamientos se consideró la data registrada en las perforaciones ubicadas en el interior del terreno, que son un total de 21.

Para verificar y confirmar la información de suelos registrada in situ se escogieron muestras representativas para ejecutar ensayos de clasificación: granulometría por tamizado y límites de Atterberg; ensayos para determinar propiedades físicas: humedad y pesos unitarios; ensayos para determinar propiedades mecánicas de los suelos cohesivos: resistencia a la compresión no confinada; y análisis químicos para determinar la agresividad de las sales del subsuelo: sales solubles totales SS y sulfatos solubles SO₄.

A continuación, se presenta los perfiles de suelos de los 10 m superiores de 3 de las perforaciones consideradas como representativas desfavorables, las cuales se ejecutaron en la zona central del terreno. Asimismo, se presentan los cuadros resumen de los ensayos de laboratorio ejecutados en muestras representativas de estas perforaciones.

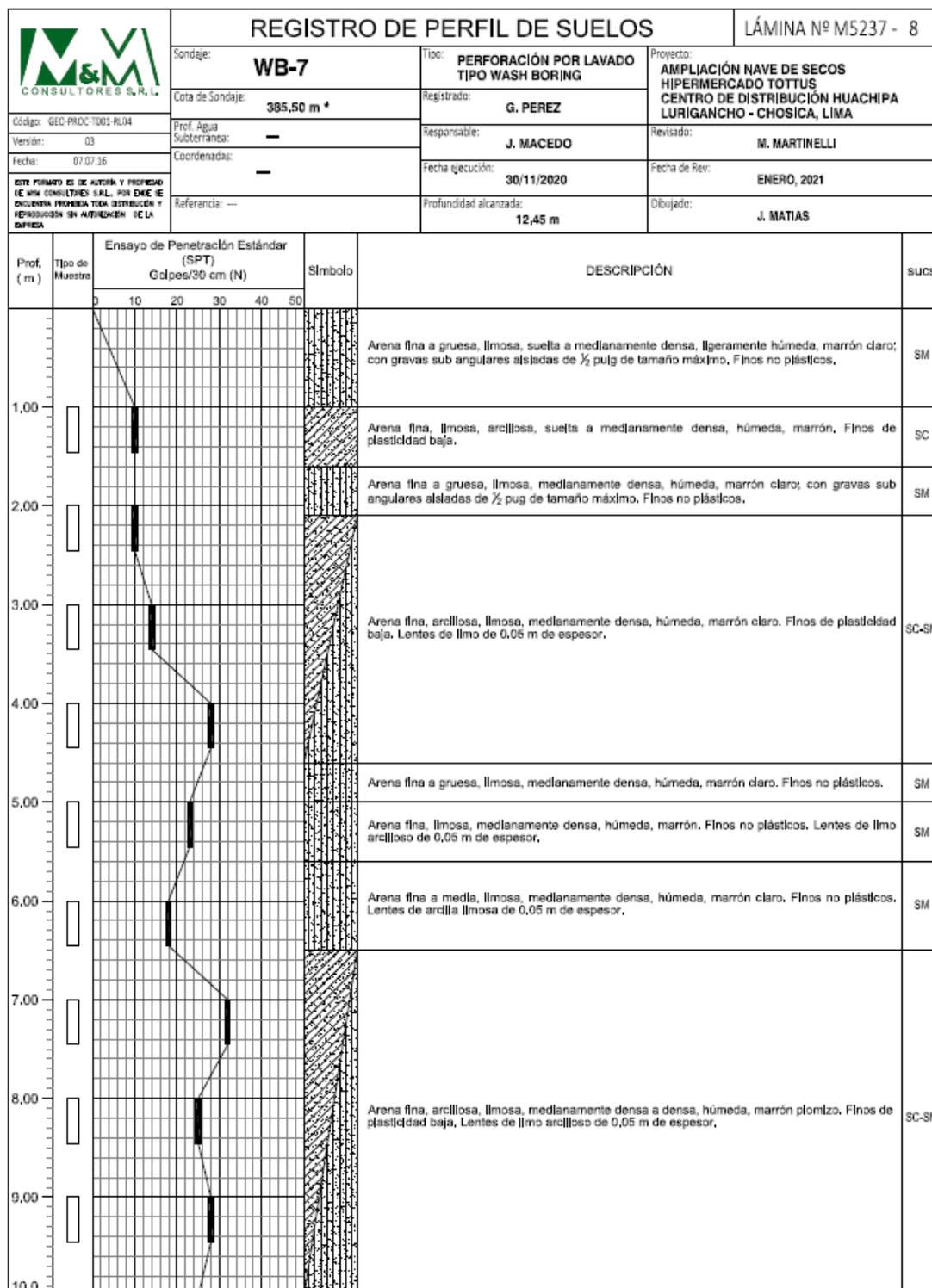
Figura 4.5
Perfil de suelos de la perforación WB-3



Nota. Referencia Martinelli (2021)

Figura 4.6

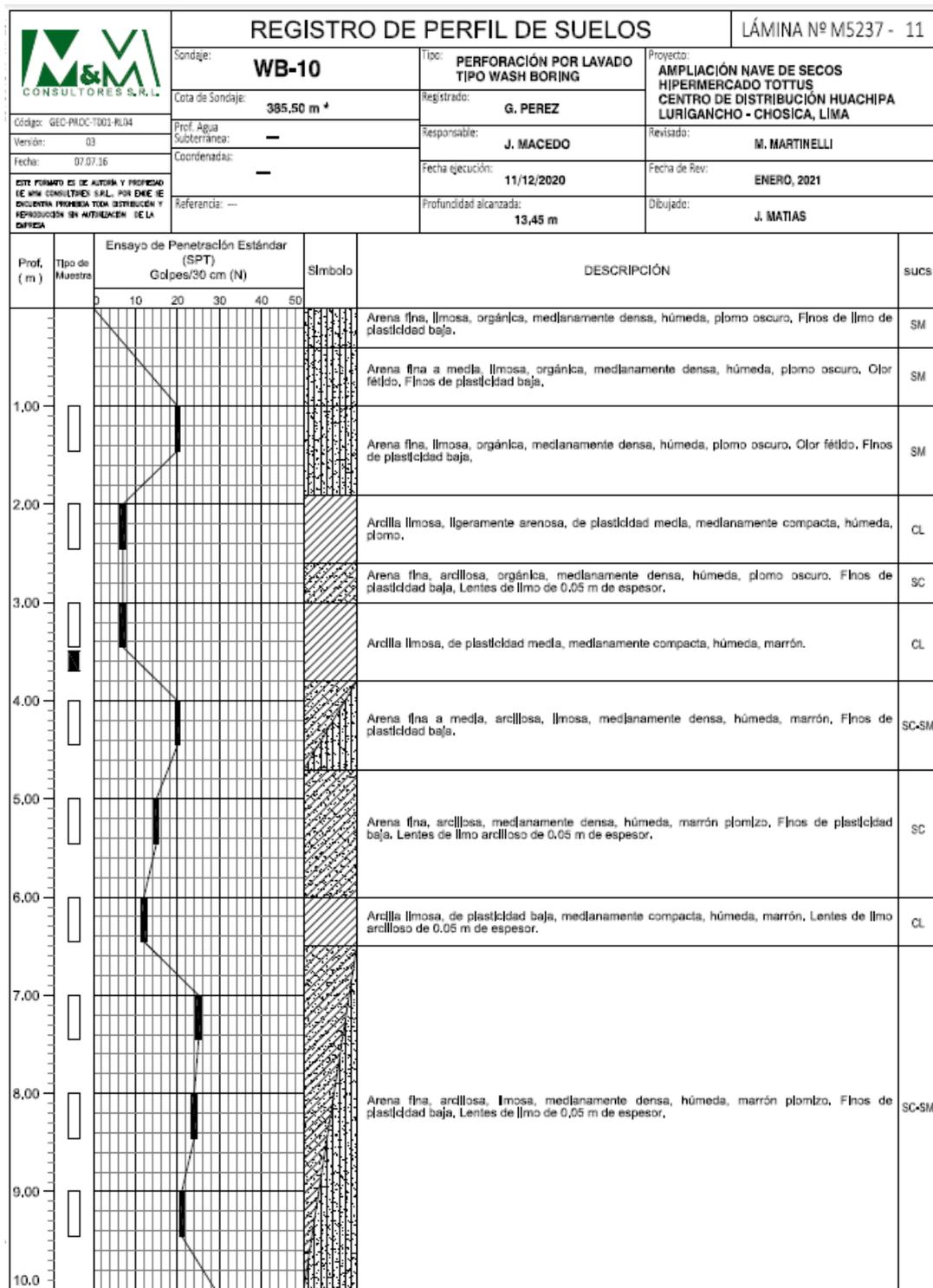
Perfil de suelos de la perforación WB-7



Nota. Referencia Martinelli (2021)

Figura 4.7

Perfil de suelo de la perforación WB-10



Nota. Referencia Martinelli (2021)

Tabla 4.1

Resultados de los análisis granulométricos por tamizado y límites de Atterberg en muestras representativas de la perforación WB-3

| Muestra | Análisis granulométrico por tamizado | | | | | | | | Límites de Atterberg | | | Humedad w (%) | SUCS | |
|---------------|--------------------------------------|------|-----|------|------|------|------|-------|----------------------|----|----|---------------|------|-------|
| | % que pasa la malla N° | | | | | | | | LL | LP | IP | | | |
| | 3/4" | 3/8" | N°4 | N°10 | N°20 | N°40 | N°60 | N°140 | | | | | | N°200 |
| 1,00 - 1,45 | | | 100 | 95 | 87 | 76 | 52 | 43 | 23 | 14 | 9 | 23,2 | SC | |
| 3,00 - 3,45 | | | | 100 | 99 | 97 | 82 | 71 | 28 | 16 | 12 | 30,3 | CL | |
| 6,00 - 6,45 | | | 100 | 99 | 96 | 91 | 82 | 60 | 52 | 24 | 14 | 10 | 24,7 | CL |
| 11,00 - 11,45 | | | | 100 | 93 | 81 | 67 | 42 | 34 | 19 | 13 | 6 | 18,6 | SC-SM |
| 14,00 - 14,45 | 100 | 98 | 98 | 97 | 91 | 76 | 59 | 38 | 32 | 19 | 13 | 6 | 18,7 | SC-SM |
| 15,00 - 15,45 | | | 100 | 99 | 97 | 95 | 90 | 53 | 35 | - | NP | NP | 21,0 | SM |

Tabla 4.2

Resultados de los análisis granulométricos por tamizado y límites de Atterberg en muestras representativas de la perforación WB-7

| Muestra | Análisis granulométrico por tamizado | | | | | | | | Límites de Atterberg | | | Humedad w (%) | SUCS | |
|---------------|--------------------------------------|------|-----|------|------|------|------|-------|----------------------|----|----|---------------|------|-------|
| | % que pasa la malla N° | | | | | | | | LL | LP | IP | | | |
| | 3/4" | 3/8" | N°4 | N°10 | N°20 | N°40 | N°60 | N°140 | | | | | | N°200 |
| 3,00 - 3,45 | | | 100 | 99 | 97 | 94 | 88 | 61 | 48 | 22 | 15 | 7 | 21,6 | SC-SM |
| 6,00 - 6,45 | | | 100 | 95 | 82 | 68 | 53 | 32 | 27 | - | NP | NP | 11,1 | SM |
| 11,00 - 11,45 | | | | 100 | 92 | 79 | 66 | 44 | 35 | 19 | 13 | 6 | 15,0 | SC-SM |

Tabla 4.3

Resultados de los análisis granulométricos por tamizado y límites de Atterberg en muestras representativas de la perforación WB-10

| Muestra | Análisis granulométrico por tamizado | | | | | | | | Límites de Atterberg | | | Humedad w (%) | SUCS | |
|-----------------|--------------------------------------|------|-----|------|------|------|------|-------|----------------------|----|----|---------------|------|-------|
| | % que pasa la malla N° | | | | | | | | LL | LP | IP | | | |
| Profundidad (m) | 3/4" | 3/8" | N°4 | N°10 | N°20 | N°40 | N°60 | N°140 | N°200 | | | | | |
| 3,50 - 3,70 | | | | 100 | 99 | 99 | 96 | 94 | | 40 | 22 | 18 | 33,2 | CL |
| 6,00 - 6,45 | | 100 | 99 | 99 | 96 | 91 | 76 | 67 | | 24 | 15 | 9 | 24,0 | CL |
| 11,00 - 11,45 | | | | 100 | 99 | 94 | 73 | 64 | | 22 | 16 | 6 | 15,0 | SC-SM |

Tabla 4.4

Resultado del ensayo de resistencia a la compresión no confinada, densidad seca y húmeda perforación WB-10

| Muestra | Clasificación Unificada SUCS | Densidad Natural γ (g/cm ³) | Humedad w (%) | Densidad Seca γ_d (g/cm ³) | Resistencia a la compresión no confinada q_u (kg/cm ²) |
|-----------------|------------------------------|--|---------------|---|--|
| Profundidad (m) | | | | | |
| 3,50 - 3,70 | CL | 1 866 | 33,20 | 1 401 | 0,73 |

4.2 PERFIL DEL SUELO

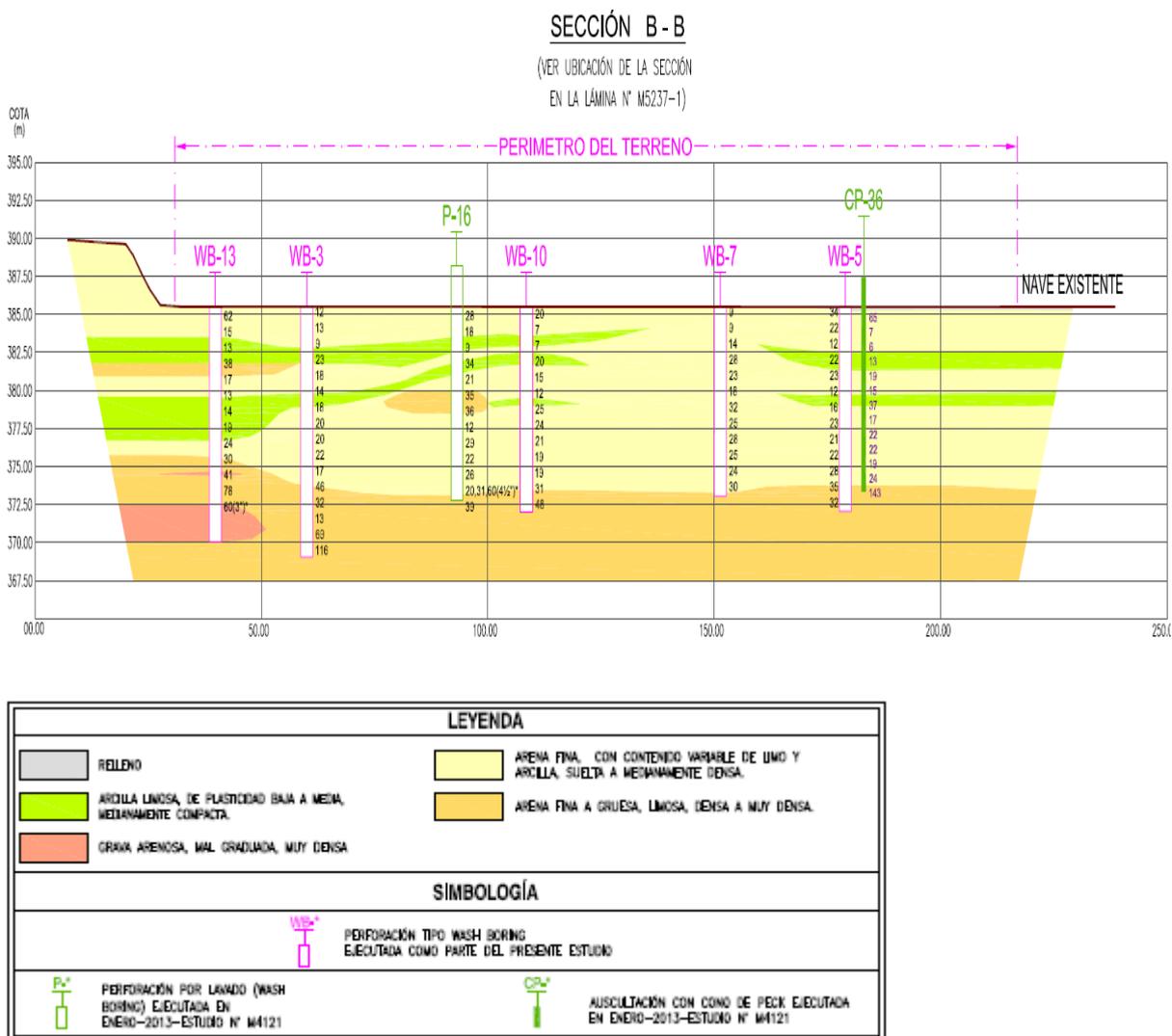
En todas las perforaciones se registró un depósito natural de arena fina a gruesa, con contenido variable de limo y arcilla, que se extiende hasta el límite de la profundidad investigada (16,45 m respecto del nivel de la plataforma existente). La densidad relativa de las arenas es variable y generalmente se encuentra en estado medianamente denso hasta profundidades comprendidas entre 8,00 y 10,00 m; y en estado denso a muy denso hasta 16,45 m de profundidad. con respecto al nivel de la superficie del terreno.

Dentro del depósito de arena se encuentran a diferentes profundidades, capas de 0,20 a 2,80 m de espesor de: arcilla de plasticidad baja a media, generalmente en estado medianamente compacto a compacto.

Sólo en las perforaciones WB-13 y WB-15 se encontraron bolsones de grava arenosa, mal graduada, densa a muy densa, a partir de 13,00 y 10,80 m de profundidad, respectivamente.

A continuación, se presenta una sesión estratigráfica de la zona central del terreno. Al lado de las perforaciones se indica los valores de N obtenidos en los ensayos de penetración estándar SPT.

Figura 4.8
Sección estratigráfica central del terreno



Nota. Referencia Martinelli (2021)

Los parámetros de resistencia al corte correspondientes a cada estrato donde se llevó a cabo un ensayo de penetración estándar en las perforaciones representativas desfavorables WB-3, WB-7 y WB-10, los cuales son ángulo de fricción interna en el caso de las arenas y cohesión en el caso de las arcillas, se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 4.5

Parámetros de resistencia al corte perforación WB-3

| Profundidad (m) | WB-3 | | | | |
|--------------------|------|-------|-----------------------|---|-------------------------------------|
| | N | N60 | Clasificación SUCS | Ángulo de fricción interna ϕ (°) | Cohesión c (Kg/cm ²) |
| 1,00 - 1,45 | 12 | 9 | SC | 29.76 | - |
| 2,00 - 2,45 | 13 | 9,75 | SC | 29.97 | - |
| 3,00 - 3,45 | 9 | 6,75 | CL | - | 0.42 |
| 4,00 - 4,45 | 23 | 19,55 | SP-SM | 32.76 | - |
| 5,00 - 5,45 | 18 | 15,3 | SC | 31.56 | - |
| 6,00 - 6,45 | 14 | 13,3 | CL | - | 0.83 |
| 7,00 - 7,45 | 18 | 17,1 | SM | 32.07 | - |
| 8,00 - 8,45 | 20 | 19 | SM | 32.61 | - |
| 9,00 - 9,45 | 20 | 19 | SM | 32.61 | - |
| 10,00 - 10,45 | 22 | 22 | SC-SM | 33.44 | - |
| 11,00 - 11,45 | 17 | 17 | SC-SM | 32.04 | - |
| 12,00 - 12,45 | 46 | 46 | SP-SM | 39.76 | - |
| 13,00 - 13,45 | 32 | 32 | SC-SM | 36.15 | - |
| 14,00 - 14,45 | 13 | 13 | SC-SM | 30.91 | - |
| 15,00 - 15,45 | 69 | 69 | SM | 45.23 | - |
| 16,00 - 16,45 | 116 | 116 | SM | 54.63 | - |

Tabla 4.6*Parámetros de resistencia al corte perforación WB-7*

| Profundidad (m) | WB-7 | | | | |
|--------------------|------|-------|-----------------------|---|-------------------------------------|
| | N | N60 | Clasificación SUCS | Ángulo de fricción interna ϕ (°) | Cohesión c (Kg/cm ²) |
| 1,00 - 1,45 | 9 | 6,75 | SC | 29.10 | - |
| 2,00 - 2,45 | 9 | 6,75 | SC-SM | 29.10 | - |
| 3,00 - 3,45 | 14 | 10,5 | SC-SM | 30.19 | - |
| 4,00 - 4,45 | 28 | 23,8 | SC-SM | 33.93 | - |
| 5,00 - 5,45 | 23 | 19,55 | SM | 32.76 | - |
| 6,00 - 6,45 | 18 | 17,1 | SM | 32.07 | - |
| 7,00 - 7,45 | 32 | 30,4 | SC-SM | 35.72 | - |
| 8,00 - 8,45 | 25 | 23,75 | SC-SM | 33.92 | - |
| 9,00 - 9,45 | 28 | 26,6 | SC-SM | 34.70 | - |
| 10,00 - 10,45 | 25 | 25 | SC-SM | 34.26 | - |
| 11,00 - 11,45 | 24 | 24 | SC-SM | 33.99 | - |
| 12,00 - 12,45 | 30 | 30 | SM | 35.61 | - |

Tabla 4.7*Parámetros de resistencia al corte perforación WB-10*

| Profundidad (m) | WB-10 | | | | |
|--------------------|-------|-------|-----------------------|---|-------------------------------------|
| | N | N60 | Clasificación SUCS | Ángulo de fricción interna ϕ (°) | Cohesión c (Kg/cm ²) |
| 1,00 - 1,45 | 20 | 15 | SM | 31.48 | - |
| 2,00 - 2,45 | 7 | 5,25 | CL | - | 0.33 |
| 3,00 - 3,45 | 7 | 5,25 | CL | - | 0.33 |
| 4,00 - 4,45 | 20 | 17 | SC-SM | 32.04 | - |
| 5,00 - 5,45 | 15 | 12,75 | SC | 30.84 | - |
| 6,00 - 6,45 | 12 | 11,4 | CL | - | 0.71 |
| 7,00 - 7,45 | 25 | 23,75 | SC-SM | 33.92 | - |
| 8,00 - 8,45 | 24 | 22,8 | SC-SM | 33.66 | - |
| 9,00 - 9,45 | 21 | 19,95 | SC-SM | 32.87 | - |
| 10,00 - 10,45 | 19 | 19 | SC | 32.61 | - |
| 11,00 - 11,45 | 19 | 19 | SC | 32.61 | - |
| 12,00 - 12,45 | 31 | 31 | SM | 35.88 | - |
| 13,00 - 13,45 | 48 | 48 | SM | 40.26 | - |

4.3 SOLICITACIONES DE CARGA

La información estructural indica que la presión estática máxima sobre las losas estructurales transmitida por los racks acumulativos será de 6 Ton/m². En cuanto a la carga máxima con sismo calculada es de 12 Ton/m² (Praxis, 2021).

Se ha considerado que la losa de cimentación diseñada por el especialista en estructuras para recibir las cargas de los racks acumulativos no presenta esfuerzos de tracción.

En cuanto a los asentamientos tolerables, el total máximo especificado es de 1 centímetro para las losas de piso.

En cuanto a la distorsión angular se ha especificado una distorsión angular admisible de 5/10000. Cabe señalar que la distorsión angular es el asentamiento diferencial entre la distancia entre 2 puntos cargados. Si consideramos una separación entre rieles de racks de 3,60 m, tenemos un asentamiento diferencial tolerable de 0,2 cm, sin embargo, tratándose de una losa de cimentación puede considerarse el ancho de toda la losa, con lo que según este criterio se tendría un asentamiento diferencial superior a 1cm. Finalmente, en este caso lo que controlará el diseño será 1 centímetro como asentamiento total.

4.4 CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS DEL SUELO NATURAL

Para determinar los asentamientos ocasionados por las cargas de los racks a instalar se ha utilizado la expresión de Terzaghi et al. (1996) descrita en el marco teórico

Respecto a los factores de corrección de los valores de N obtenidos en los ensayos de penetración estándar, para la corrección por energía de martillo C_E , en el presente caso se considera 1 con base a la medición de energía del equipo utilizado (martillo tipo Donut), realizado por la Universidad Nacional de Ingeniería (2022).

Con relación al valor de C_B se ha considerado 1 por el diámetro de las perforaciones realizadas y en cuanto a C_s un valor de 1 correspondiente a muestreador estándar.

Para fines de análisis se ha considerado una carga aplicada por la losa de piso de 6 Ton/m^2 ($0,60 \text{ Kg/cm}^2$) que es la carga requerida por estructuras, aplicada en franjas alargadas de 3,60 m de ancho, que contemplan el peso del piso, racks en la parte central y la mitad del pasillo a ambos lados de cada fila de racks, por lo que en la expresión corresponde un ancho B de 3,60 m y factor de forma $f_F = 0,64$.

En cuanto al valor de $B^{0,75}$, que corresponde a la profundidad del bulbo de presiones en suelos granulares en el cual debe considerarse el valor de N_{60} , en este caso sería representativo 2,61 m y por lo tanto se tiene que la corrección por longitud de barras es $C_R = 0,75$.

No hay napa freática dentro de la profundidad investigada, por lo que el factor de corrección por nata resulta ser $f_{NF} = 1$.

Para determinar los asentamientos totales se ha considerado la expresión mencionada en el marco teórico para el cálculo de asentamientos en suelos granulares.

Para determinar el asentamiento diferencial si bien puede obtenerse de la comparación entre asentamientos totales, se ha considerado en este caso la estimación de la Norma Técnica de Edificación E050: Suelos y Cimentaciones (2018) que considera al asentamiento diferencial como el 75% del total.

Los asentamientos determinados considerando los criterios indicados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.8
Asentamientos totales y diferenciales esperados

| Perforación | N promedio | Asentamiento total(cm) | Asentamiento diferencial (cm) |
|--------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| WB-1 | 18,0 | 1,67 | 1,25 |
| WB-2 | 20,0 | 1,44 | 1,08 |
| WB-3 | 11,3 | 3,19 | 2,39 |
| WB-4 | 17,7 | 1,71 | 1,28 |
| WB-5 | 22,7 | 1,21 | 0,91 |
| WB-6 | 22,3 | 1,23 | 0,93 |
| WB-7 | 10,7 | 3,47 | 2,60 |
| WB-8 | 20,7 | 1,38 | 1,03 |
| WB-9 | 10,7 | 3,47 | 2,60 |
| WB-10 | 11,3 | 3,19 | 2,39 |
| WB-11 | 13,7 | 2,45 | 1,84 |
| WB-12 | 12,7 | 2,73 | 2,05 |
| WB-13 | 30,0 | 0,82 | 0,61 |
| WB-14 | 16,0 | 1,97 | 1,48 |
| WB-15 | 12,3 | 2,83 | 2,12 |
| P-14 | 21,0 | 1,34 | 1,01 |
| P-16 | 24,0 | 1,12 | 0,84 |
| P-19 | 23,0 | 1,18 | 0,89 |
| P-21 | 22,7 | 1,21 | 0,91 |
| P-22 | 22,7 | 1,21 | 0,91 |
| P-23 | 15,7 | 2,03 | 1,52 |

En la tabla se observa que en general los asentamientos totales esperados determinados con base a los resultados de los ensayos de penetración estándar SPT son mayores de 1 cm y más del 50% de los asentamientos diferenciales superan el valor de 1 cm. Cabe señalar, que, si bien normalmente se hace el análisis de los asentamientos diferenciales, en este caso se ha considerado conservadoramente en los cálculos un asentamiento total tolerable de 1 cm para la situación desfavorable de racks cargados y racks sin cargar.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se concluye que en el presente caso es necesario llevar a cabo un mejoramiento del terreno que permita mitigar los asentamientos esperados hasta un valor máximo de 1 cm.

4.5 ALTERNATIVAS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS

Existen actualmente diferentes alternativas para mejoramiento de terrenos de fundación, que permiten incrementar su resistencia al corte y reducir los asentamientos que se producirán por efecto de las cargas transmitidas al terreno.

En el presente caso se evaluaron las siguientes técnicas:

a) Pilas de agregado compactado

Este sistema corresponde a un mejoramiento de suelo a través de la incorporación de pilas de agregado compactado, las cuales se van compactando a medida se construyen por capas mediante un mandril apisonador, vibrado e hincado por un martillo de alta frecuencia. El sistema genera pilas de agregado semi rígidas capaces de atraer tanto esfuerzos normales (carga axial) como de cargas de corte (durante eventos sísmicos), produciéndose por el proceso constructivo un empuje pasivo en el suelo colindante a la pila.

Tratándose de losas planas de relativamente poco espesor las que recibirán las cargas de los racks y las transmitirán al suelo reforzado con las pilas de agregado compactado, debe considerarse una capa de transferencia conformada por relleno de material granular seleccionado de por lo menos 0.40 m de espesor, debidamente compactado.

b) Inclusiones rígidas

El sistema de mejoramiento en este caso considera la instalación de elementos rígidos de concreto, también denominadas por algunos proveedores como columnas

de módulo controlado (CMC). El objeto del sistema es aumentar las capacidades de un suelo con propiedades mecánicas deficientes.

Las inclusiones rígidas CMC se construyen desde una plataforma de trabajo, sobre la cual deberá colocarse luego una capa de relleno de material granular seleccionado compactado de 0,40 m de espesor, que trabajará como un colchón granular. Las inclusiones de concreto en el terreno evaluado debían atravesar los diferentes estratos de suelo de baja resistencia y apoyarse en el estrato de matriz de arena medianamente densa a densa que se encuentra a una profundidad de 6.65 m respecto del nivel de la plataforma de trabajo existente, que es la superficie de corte. Se evaluaron inclusiones rígidas de concreto de 0,40 m de diámetro con un arreglo cuadrangular, con distancia entre centros no menor de 2,60 m.

Tal como se indica en el párrafo anterior, igual que en el caso de la técnica con pilas de agregado compactadas, debe considerarse una capa de transferencia entre las losas de piso y el suelo reforzado con las inclusiones de por lo menos 0,40 m de espesor.

Cabe señalar, que, en el análisis de este tipo de refuerzo del terreno, se considera tanto el aporte de la fricción y punta de las inclusiones, como el aporte del suelo natural que queda entre las inclusiones.

c) Columnas de grava compactada

Este sistema de mejoramiento del terreno considera la incorporación en el terreno de columnas de grava. Este sistema permite atravesar suelos finos (arenas, arcillas y limos) con una compacidad máxima que no supere las características de media a dura para todos los casos. En el caso de que se deban atravesar suelos con una compacidad mayor sería necesario el uso de preforos, los cuales deberían ser realizados con equipos complementarios de perforación. En el presente caso esto no sería necesario, por cuanto no se han registrado suelos resistentes entre las capas superiores de suelos de baja resistencia.

En el cálculo de la cantidad de columnas requeridas se toma en cuenta la metodología de Priebe, que busca obtener los parámetros del suelo equivalente mejorado combinando los parámetros de resistencia al corte y módulo de deformación del suelo natural y las propiedades propias de las columnas de grava. Como herramientas de cálculo emplea varios factores de mejora incluyendo volúmenes de reemplazo, reparto de la carga y profundidad de mejoramiento. Toma en cuenta la relación entre los módulos de deformación entre el suelo y la columna de grava.

Considerando que el diámetro evaluado fue de 0,80 mínimo, esto es mayor que el diámetro de las pilas de agregado compactado y el diámetro de las inclusiones rígidas, en esta solución no se considera necesario la colocación de la capa de relleno de transferencia.

d) Geoceldas

Las geoceldas constituyen un sistema de confinamiento celular para el soporte de cargas dado que: aumentan el módulo mecánico de la capa de suelo granular incrementando la capacidad de carga de la estructura. Este sistema resiste a tensión en la capa reforzada generando un efecto de viga, que atenúa la presión aplicada localmente controlando la compresibilidad del suelo de subrasante. Para el relleno de las geoceldas pueden considerarse diferentes tipos de materiales, tales como agregados pétreos y arenas. También puede considerarse concreto hidráulico, concreto hidráulico reciclado o concreto asfáltico, dependiendo de su aplicación.

e) Reemplazo de Suelos

Esta solución en el presente caso comprendía el reemplazo de por lo menos los 3 m superiores de suelos heterogéneos que recibirían las cargas de la losa, por un material granular seleccionado, preferentemente grava arenosa, bien o mal graduada, limpia o ligeramente limosa o ligeramente arcillosa, colocado por capas horizontales de no más de 0,20 m de espesor, cada una de las cuales debía compactarse a un mínimo del 95% de la máxima densidad seca del ensayo proctor

modificado. Entre las capas de relleno debían colocarse geomallas que permitieran atenuar las deformaciones que podrían producirse bajo el relleno estructural de reemplazo. La capa superior del relleno que sería la base granular de las losas, que debería compactarse al 100% de la máxima densidad seca del ensayo proctor modificado.

El suelo al nivel de corte, sobre el cual se colocará el relleno también deberá compactarse al 95% de la máxima densidad seca del ensayo proctor modificado.

En el presente caso se analiza la solución de mejoramiento del terreno con pilas de grava compactada, que resulta conveniente tratándose de un sistema similar al utilizado para el mejoramiento del suelo de fundación de la nave colindante y puede llevarse a cabo un plazo relativamente corto de tiempo.

4.6 CÁLCULO DEL MEJORAMIENTO DE SUELOS CON LAS PILAS DE AGREGADO COMPACTADO

En primer lugar, se ha determinado el espesor de suelo a mejorar. Se ha determinado un espesor de suelo a mejorar de 4,10 m para abarcar la capa de arenas menos resistentes y alcanzar una profundidad mayor que 1,25 veces la franja cargada por cada línea de racks (franjas de losa), de tal manera de alcanzar una profundidad donde la carga uniformemente transmitida sea del orden del 50% de la carga transmitida a nivel de superficie, determinada de acuerdo con la formulación de Boussinesq.

Se ha considerado pilas de 0,61 m de diámetro en función del equipo disponible para su ejecución, siendo el área de la sección de las pilas de 0,29 m². Estas pilas de acuerdo a las características de los suelos que atravesarán les corresponde según el Manual de Geopier (Fox & Cowell, 1998) un módulo de rigidez (kg) de 250 lb/pulg³, esto es 6 920 Ton/m³.

Si consideramos un módulo de rigidez k_{30} mínimo = 3 Kg/cm³ (CTE para una arena media), tenemos que para la franja de $B = 3.60$ m evaluada $k = k_{30} ((B+0.3)/2B)^2 = 0.88$ Kg/cm³ = 880 Ton/m³.

En cuanto al valor del módulo de rigidez para la franja rectangular es $k_{\text{rect}} = 880 \text{ Ton/m}^3 \times 2/3 \times (1 + B/2L) = 880 \times 2/3 \times (1 + 3.60/2 \times 186) = 592 \text{ Ton/m}^3 \approx 600 \text{ Ton/m}^3$.

Por lo tanto, la relación de rigideces resulta ser $R_s = 6\,920/600 = 11,5$.

Mediante tanteos obtenemos una distancia entre centros de pilas de agregado compactado de 2,40 m distribuidas en forma cuadrangular, por lo que el área de influencia de cada pila será 5,76 m².

Por lo tanto, la relación de áreas es $R_a = 0,29/5,76 = 0,05$, esto es 5%.

a) Cálculo del asentamiento de la capa superior de suelo reforzado

Para verificar que el diseño satisface los requerimientos de asentamientos tolerables, en primer lugar, determinamos la carga que estaría aplicada al tope de las pilas de agregado compactado de 0,61 m de diámetro espaciadas cada 2,40 m centro a centro, bajo una carga repartida q de 6 Ton/m².

El valor obtenido q_g obtenido reemplazando valores de q , R_s y R_a en la siguiente ecuación mostrada en el ítem 2.2.9:

$$q_g = q \frac{R_s}{R_a R_s - R_a + 1} \text{ es de } 45,2 \text{ Ton/m}^2.$$

El asentamiento determinado reemplazando los valores indicados en las fórmulas basadas en la analogía de resortes (Lawton y Fox 1994, Wissmann y Fox 2000) y considerando que en el presente caso la fuerza Q que se aplica, corresponde a la carga de los racks, se obtiene considerando que la cimentación, en este caso la losa de concreto, es rígida en relación con el suelo mejorado de apoyo: $S_{uz} = q_g/k = 45,2/6\,920 = 0,006 \text{ m} = 0,6$ centímetros.

Se ha verificado este valor usando la metodología del módulo elástico compuesto, donde el asentamiento en la zona superior reforzada (zona de suelo reforzado usando el sistema de pilas de agregado compactado). Se ha considerado la metodología de Terzaghi et al. (1996) descrita en el marco teórico, que considera la siguiente expresión:

$$S_{uz} = \frac{q \cdot I_z \cdot H}{E_{comp}}$$

En el presente caso se ha efectuado la verificación la carga repartida de 6 Ton/m².

El módulo de elasticidad del suelo matriz se ha determinado considerando la formulación de Alva (2012) para el valor de N₆₀ promedio. Si reemplazamos N₆₀ = 18 en la ecuación E = 50 (N + 15), Alva (2012), para N₆₀ = 18, obtenemos un módulo de elasticidad de 1650 Ton/m².

El módulo de elasticidad compuesto determinado con la siguiente ecuación descrita en el ítem 2.2.10 para un módulo de elasticidad de las pilas de agregado compactado de 8 000 Ton/m², por lo tanto, en este caso:

$$\begin{aligned} E_{comp} &= E_g R_a + E_m (1 - R_a) \\ &= 8\,000 \times 0,05 + 1\,650 (1 - 0,05) = 1\,967,5 \text{ Ton/m}^2. \end{aligned}$$

Cabe señalar, que el ángulo de fricción interna que le corresponde a las pilas de agregado compactado es superior a los 45°, correspondiéndole por lo tanto un elevado módulo de elasticidad.

El espesor de la capa compresible corresponde en este caso al espesor de suelo mejorado, esto es 4,10 m.

El factor de influencia a la profundidad del suelo compresible se ha determinado de acuerdo con las gráficas de Terzaghi para la relación entre la

profundidad de la capa reforzada y la franja analizada, que sería $Z/B = 4,10/3,60 = 1,14$ para una relación $L/B > 10$, siendo $I_z = 0,5$.

Reemplazando los valores indicados en la ecuación, obtenemos lo siguiente:

$$S_{uz} = \frac{6 \times 0,5 \times 4,10}{1967,5} = 0,006 \text{ m} = 0,6 \text{ cm}$$

Este valor de asentamiento es igual al obtenido con la primera metodología.

b) Cálculo del asentamiento en la zona inferior

En el presente caso que se tienen suelos predominantemente granulares arenosos bajo la capa de suelos reforzada, conformando la zona inferior de análisis, los asentamientos de esta capa inferior se han estimado usando la teoría de elasticidad, utilizando la siguiente expresión:

$$S_{lz} = \frac{q I H_{lz}}{E_s}$$

Donde:

| | | |
|----------|---|---|
| S_{lz} | = | Asentamiento en la zona inferior |
| q | = | Esfuerzo de contacto en la base de la cimentación |
| I | = | Factor de influencia de esfuerzos |
| H_{lz} | = | Espesor de suelos considerado |
| E_s | = | Módulo de elasticidad del suelo |

La carga repartida estimada bajo la capa de suelos mejorada en este caso es el 50% del total en la superficie, esto es 3 Ton/m^2 .

Para el suelo natural se considera un módulo de elasticidad promedio del suelo estimados usando correlaciones de Schmertmann, donde el valor de entrada es el número de golpe NSPT indicado en el estudio de mecánica de suelos.

Reemplazando en la fórmula indicada los valores de I_z y módulo de elasticidad correspondientes al suelo arenoso bajo la capa de suelo reforzada obtenemos:

$$S_{Iz} = \frac{3 \times 0,52 \times 3,60}{1800} = 0,003 \text{ m} = 0,3 \text{ cm}$$

c) Cálculo del asentamiento total

El asentamiento total de la losa se calcula sumando los asentamientos calculados para la capa de suelo reforzado más los calculados para la capa de suelos naturales existentes debajo.

En este caso tenemos 0,6 centímetros por efecto de la carga repartida aplicada (6 Ton/m^2) en la capa superior de suelo reforzado y 0,3 cm debajo cm según los cálculos efectuados. Sumando ambos tenemos un asentamiento total de 0,9 cm que es menor que el tolerable que en este caso es de 1 cm.

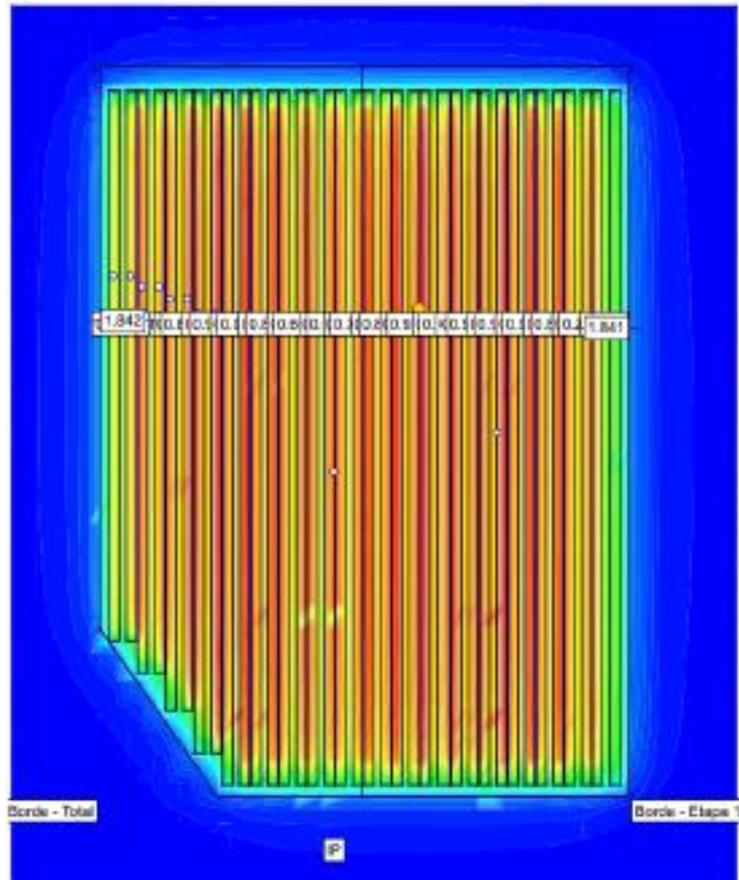
Se ha efectuado la verificación mediante un programa de cálculo tridimensional de Roc Science con la misma metodología expuesta, considerando la condición reforzada de la capa superior de suelos.

Se muestra a continuación un esquema del modelo tridimensional para evaluar los asentamientos máximos esperados para las cargas de las estructuras previstas en el proyecto.

Los resultados del análisis de asentamiento estático, en condición reforzada con pilas de agregado compactado, muestran igualmente un asentamiento total máximo de 0,91 centímetro para las losas de piso. Por lo que se estaría cumpliendo el requerimiento del proyecto, de asentamiento total admisible es de 1 centímetro. Se muestra a continuación un esquema del modelo tridimensional:

Figura 4.9

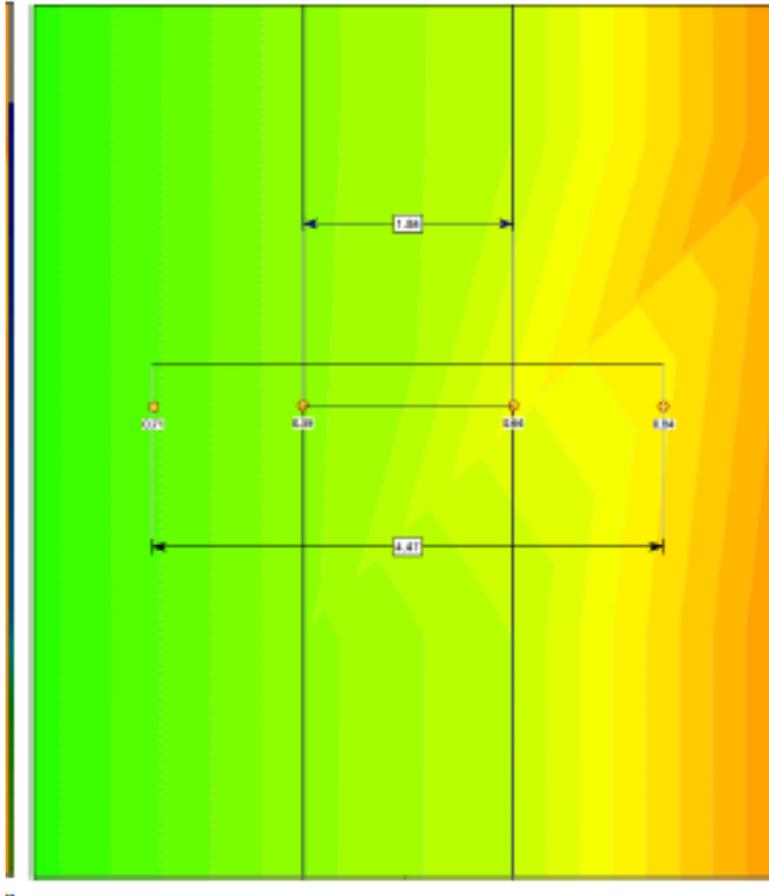
Modelo tridimensional para estimación de asentamiento en condición mejorada



Asimismo, se ha evaluado la distorsión angular entre los rieles de los racks en condición mejorada, y se cumple con la distorsión angular admisible de 5/10000 en condición mejorada con pilas de agregado compactado.

Figura 4.10

Resultados de asentamientos diferenciales entre rieles de racks en condición mejorada con pilas de agregado compactado

**4.7 SOLUCIÓN DE DISEÑO**

La solución de diseño planteada consiste en emplear pilas de agregado compactado de 0,61 metros de diámetro en un espesor de suelo de 4,10 m. Sobre esta capa se considera la colocación de una capa de repartición de 0,40 m de espesor, conformada por material granular seleccionado, colocado en dos capas de 0,20 m de espesor, cada una de las cuales debe compactarse al 95% de la máxima densidad seca del ensayo proctor modificado.

El espaciamiento entre centros de pilas de agregado compactado determinado para cumplir con el requerimiento de asentamiento tolerable es de 2,40 m centro a centro en un arreglo cuadrangular bajo tora la losa de la nave.

En el Figura 6.2 se muestra la distribución de pilas de agregado compactado en el emplazamiento de la nave de secos del centro de distribución, considerado el espaciamiento indicado.

Cabe señalar, que se ha asumido que se acuerdo a lo indicado por el especialista estructural la losa de cimentación no presentan esfuerzos de tracción.

El presente diseño de pilas de agregado compactado permite que la estructura soporte una máxima presión estática de 6 Ton/m², que es el valor objetivo solicitado por el especialista estructural.

4.8 VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

La hipótesis general del presente trabajo de investigación es: La incorporación de pilas de grava compactada mejora el terreno de fundación del almacén del CD para reducir los asentamientos diferenciales.

En el presente caso se ha efectuado el diseño del reforzamiento del terreno para reducir el asentamiento hasta el valor admitido por las estructuras, que es de 1 centímetro.

Luego, se ha determinado en el perfil del suelo de cada una de las perforaciones tomadas en cuenta para fines de análisis, los asentamientos esperados bajo las solicitaciones de carga, observándose en primer lugar, la disminución de asentamientos esperados respecto a los asentamientos sin refuerzo del terreno y luego, que no se exceda en ningún caso de 1 centímetro.

En la siguiente gráfica se muestra la frecuencia de asentamientos esperados en las perforaciones considerando el suelo reforzado, cada 0,1 cm.

Estadística descriptiva:

Figura 4.11

Histograma de asentamientos esperados en el suelo reforzado



Asentamientos esperados en el suelo reforzado con pilas de grava compactada (cm)

Tabla 4.9

Estadística de asentamientos esperados en cm en el suelo reforzado considerando los perfiles de suelos de las perforaciones

| N | Media | Desv.Est. | Error estándar de la media | Limite superior de 95% para μ |
|----|--------|-----------|----------------------------|-----------------------------------|
| 21 | 0.8486 | 0.0958 | 0.0209 | 0.8846 |

$\mu =$ media de población de asentamientos con refuerzo

Estadística inferencial:

Para la verificación de hipótesis utilizó la estadística inferencial partiendo de lo siguiente:

H_0 = Hipótesis nula: La incorporación de pilas de grava compactada NO mejora el terreno de fundación del almacén del CD para reducir los asentamientos diferenciales.

H_1 = Hipótesis alterna: La incorporación de pilas de grava compactada mejora el terreno de fundación del almacén del CD para reducir los asentamientos diferenciales.

Para la determinación de la hipótesis y al contar con una muestra menor de 30 unidades se utilizó la prueba estadística “t” de student en el software Minitab considerando un nivel de confianza de 95% y un nivel de significancia de 0,05. De acuerdo con la teoría se tienen 2 escenarios posibles:

Valor $P >$ nivel de significancia (0,05): no se rechaza la hipótesis nula.

Valor $P <$ nivel de significancia (0,05): se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

Figura 4.12

Resultados de prueba T de student en Minitab

| Prueba | |
|-------------------|----------------|
| Hipótesis nula | $H_0: \mu = 1$ |
| Hipótesis alterna | $H_1: \mu < 1$ |
| Valor T | Valor p |
| -7.25 | 0.000 |

Como se observa en el resultado de la prueba, el valor P es igual a 0,000 y es menor que el nivel de significancia (0.05) por lo que se rechaza la hipótesis nula. De esta manera, se comprueba que la hipótesis general planteada es correcta, es decir la incorporación de pilas de grava compactada mejora el terreno de fundación del almacén del CD para reducir los asentamientos diferenciales.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Con la información del estudio de mecánica de suelos efectuado se estimaron los asentamientos totales y diferenciales esperados por efecto de las cargas de los racks a partir de las propiedades mecánicas del suelo de fundación del almacén del centro de distribución. Los valores determinados excedían de 1 cm, que es el requerido por las estructuras en el presente caso, por lo que se determinó la necesidad de hacer un mejoramiento del terreno.

Se evaluaron diferentes metodologías de mejoramiento de suelos para reducir los asentamientos diferenciales en el terreno de fundación del almacén del centro de distribución. Se analizaron las pilas de agregado compactado, columnas de grava, inclusiones rígidas, geoceldas y reemplazos de suelos. Se decidió considerar la primera solución que en el presente caso resultaba técnica adecuada y además se contaba con experiencia con este sistema en la nave colindante existente.

Se realizaron los cálculos de diámetro, profundidad y espaciamiento de pilas para cumplir con las exigencias del proyecto, lográndose reducir los asentamientos diferenciales con la incorporación de pilas de grava compactada en el suelo de fundación de la nave del centro de distribución.

La solución de diseño planteada consiste en reforzar un espesor de suelo de 4,10 m, mediante la incorporación de pilas de agregado compactado de 0,61 m de diámetro, en un arreglo cuadrangular, espaciadas 2,40 m centro a centro.

Se llevaron a cabo análisis de asentamiento de la capa superior de suelo reforzado utilizando el método de módulo ponderado que toma en cuenta la rigidez de los elementos colocados, la rigidez del suelo circundante, y el área de cobertura para la zona reforzada; comprobando dicho resultado con la metodología del

módulo elástico compuesto, donde el asentamiento en la zona superior reforzada (zona de suelo reforzado usando el sistema de pilas de agregado compactado) se estima usando formulaciones convencionales para cálculo de asentamientos; en el presente caso se considerará la metodología de Terzaghi et al. (1996).

Los asentamientos esperados bajo la zona reforzada se estimaron usando las teorías convencionales de elasticidad (Terzaghi y Peck, 1967).

La verificación de los asentamientos totales esperados se llevó a cabo mediante un programa de cálculo tridimensional.

Tanto los resultados efectuados directamente con las fórmulas detalladas, como los resultados del análisis tridimensional, muestran un asentamiento total máximo menor de 1 centímetro para las losas estructurales, para la carga repartida de 6 Ton/m^2 , cumpliéndose así con el requerimiento estructural.

Asimismo, se verificó que la distorsión angular entre los rieles de los racks en condición mejorada fuera menor de $5/10000$ tal como era requerido.

CAPÍTULO VI

PROPUESTA DE SOLUCIÓN

6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA FOCALIZADO

6.1.1 Problemática de los centros de distribución

Los centros de distribución tanto en el Perú como en diferentes partes del mundo, a pesar de contar con naves industriales amplias en área, cada vez optimizan más el espacio considerando racks acumulativos altos de varios niveles, lo cual implica mayores cargas a transmitir al terreno.

Lo indicado es una consecuencia de los costos de los terrenos. Según Romana Ruiz (2004), los terrenos resultan ser cada vez un bien más escaso, cuyo precio puede alcanzar valores astronómicos. Sin llegar a exageraciones como los precios de los terrenos en grandes urbes como Tokyo y Nueva York; en todas partes del mundo, incluyendo el Perú, no solo crece la demanda de espacio, sino también aumenta el precio. Por lo indicado resultan cada vez más económicas y más utilizadas todas las técnicas que pueden contribuir a crear, mejorar y aprovechar mejor, los espacios, aunque el terreno no sea el mejor desde el punto de vista geotécnico. Como consecuencia de lo indicado, se han desarrollado diversas técnicas a nivel mundial para mejorar el comportamiento del terreno que recibirá mayores cargas.

Por otro lado, la tendencia moderna es a automatizar los centros de distribución para obtener mayor control de las mercancías, lograr mayor productividad, evitar retrasos y finalmente, optimizar la gestión de los almacenes.

Para la operación entre rack se están utilizando actualmente robots móviles, que son autónomos y pueden movilizar las mercancías entre los racks, los cuales tienen diferentes niveles.

Sin embargo, para un correcto funcionamiento de los robots indicados, es necesario contar con losas superplanas, siendo los asentamientos diferenciales una limitante importante. En el caso específico materia del presente proyecto de tesis, el asentamiento diferencial tolerable estipulado por el fabricante es de 1 cm.

Siendo el perfil estratigráfico del terreno materia del presente trabajo de investigación heterogéneo y conformado por suelos de baja a mediana resistencia, resulta imprescindible llevar a cabo un trabajo de mejoramiento para controlar las deformaciones del terreno y mitigar los asentamientos diferenciales hasta un valor aceptable para los requerimientos del proyecto.

Cabe señalar, que esta situación no es diferente a lo que puede encontrarse en otros terrenos, ya que resulta difícil encontrar extensiones de terreno con características uniformes que puedan garantizar la ocurrencia de asentamientos diferenciales reducidos en respuesta a la aplicación de incrementos de cargas correspondientes a las estructuras y los racks acumulativos.

Entre las técnicas se encuentran las pilas de grava compactada, que son las que se han evaluado, con la finalidad de recibir las cargas de los racks y las losas de piso garantizando la ocurrencia de asentamientos diferenciales menores de 1 cm.

6.1.2 Características particulares del caso

Los asentamientos totales y diferenciales calculados con la información de los ensayos de penetración estándar efectuados en las perforaciones y los resultados de los ensayos de laboratorio exceden a los máximos estipulados en el proyecto estructura.

Definitivamente la ocurrencia de asentamientos diferenciales mayores que los exigidos por el fabricante no solo afectarán el correcto funcionamiento de los robots y por ende del centro de distribución, sino que se corre el riesgo de perder la garantía de los equipos adquiridos para el funcionamiento del almacén. Evidentemente la formación de fisuras o hundimientos localizados serán aspectos críticos desfavorables y no deseados, que impedirán un buen funcionamiento.

Por lo indicado en el presente caso es necesario llevar a cabo un mejoramiento del terreno, que resulte más económico que las soluciones convencionales de tipo profundo con pilotes o las cimentaciones que consideran reemplazo de espesores importantes de suelos.

6.2 DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

La propuesta de solución considera la incorporación de pilas de agregado compactado en un espesor de suelos para recibir las cargas estipuladas en el proyecto, esto es 6 Ton/m² en condiciones estáticas y 12 Ton/m² en condiciones sísmicas y mitigar la ocurrencia de asentamientos hasta un valor total máximo de 1 centímetro.

El sistema de mejoramiento genera pilas de agregado semi rígidas con capacidad de atraer tanto esfuerzos normales (cargas verticales) como esfuerzos de corte (como los que se producen en eventos sísmicos), dado que por su propio proceso constructivo se produce un empuje pasivo en el suelo colindante a la pila, que termina modificando los esfuerzos principales del suelo e incrementa la capacidad de carga por corte.

Las características de la variable independiente que en este caso son las pilas de agregado compactado son las siguientes:

Tamaño:

- ✓ Diámetro: 0,61 m
- ✓ Longitud: 4,10 m

Espaciamiento:

- ✓ Distancia entre centros: 2,40 m

Otras características:

- ✓ Material de la pila: grava angular triturada o chancada 1/2 a 1 1/2 pulgada de tamaño máximo, con máximo 10% de material pasante la malla No 200.

Solicitaciones de carga transmitida por la losa de piso:

- ✓ Condiciones estáticas: 6 Ton/m²
- ✓ Condiciones sísmicas: 12 Ton/m²

Asentamientos tolerables:

- ✓ Asentamiento total: 1 centímetro
- ✓ Distorsión angular: 5/10000

Capa de transferencia entre la losa de piso y la capa de suelo mejorada:

- ✓ 0,40 m de espesor, conformada por material granular seleccionado, colocado y compactado en 2 capas de 0,20 m al 95% de la máxima densidad seca del ensayo proctor modificado cada una.

Distribución en planta:

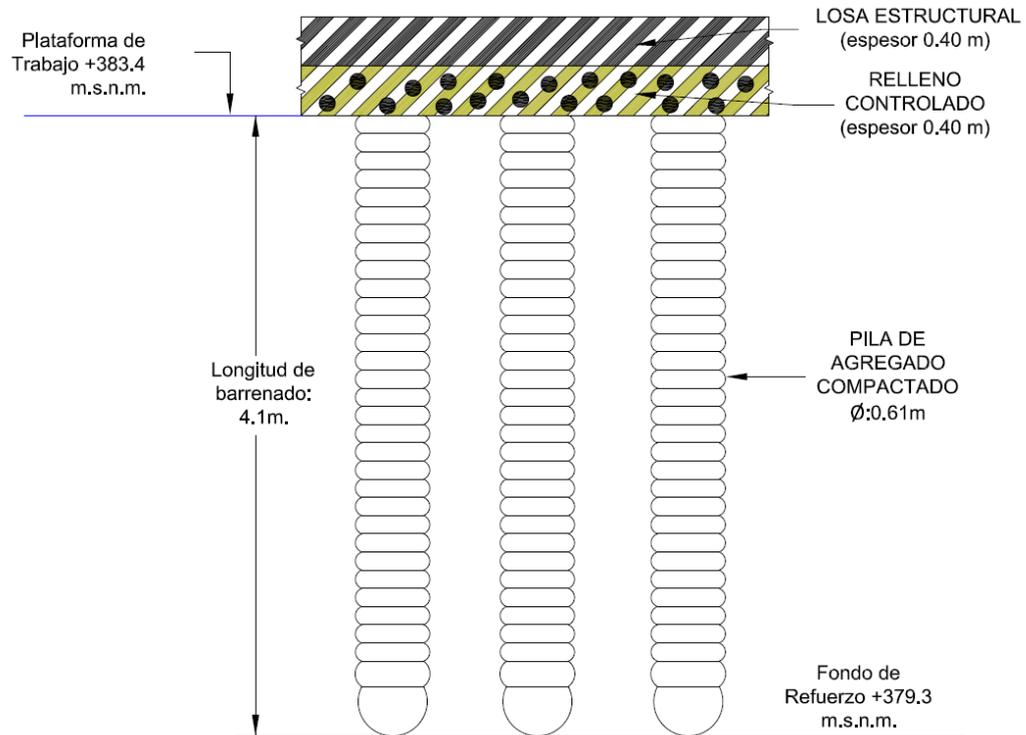
- ✓ Abarcando toda el área de la nave
- ✓ Cantidad de pilas: 4 455

Control de calidad:

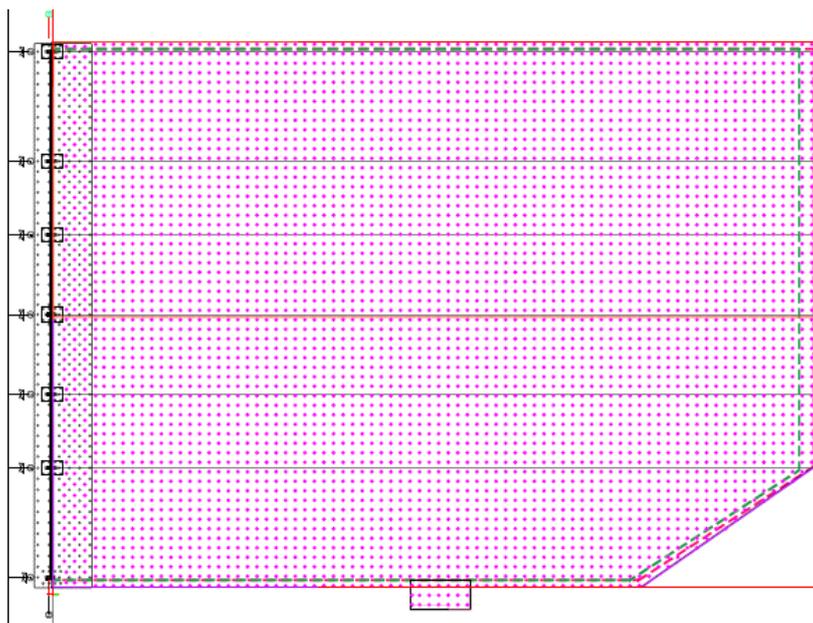
- ✓ Pruebas de módulo: 4 mínimo
- ✓ Control de asentamientos: en el 10% de las pilas

Figura 6.1

Esquema de solución propuesta con pilas de agregado compactado

**Figura 6.2**

Distribución de pilas de agregado compactado



6.3 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

En primer lugar, debe conformarse una plataforma de trabajo a un nivel de 0.40 m por debajo del nivel de apoyo de la losa de piso que recibirá las cargas de los racks acumulativos.

La plataforma debe ser horizontal, drenada y estable de tal manera que permita el paso de los equipos requeridos para la instalación de las pilas.

Las pilas se conforman compactando el agregado por capas mediante un mandril apisonador, vibrado e hincado por un martillo de alta frecuencia.

Las pilas de agregado compactado se construyen primero hincando en el suelo un apisonador cuyo diámetro es de 35 centímetros aproximadamente, con ayuda de una fuerza estática aumentada por una energía de impacto dinámica vertical. Se hinca también conjuntamente, un tubo hueco especialmente diseñado y patentado por la empresa Geopier.

El procedimiento de trabajo en este caso es el siguiente:

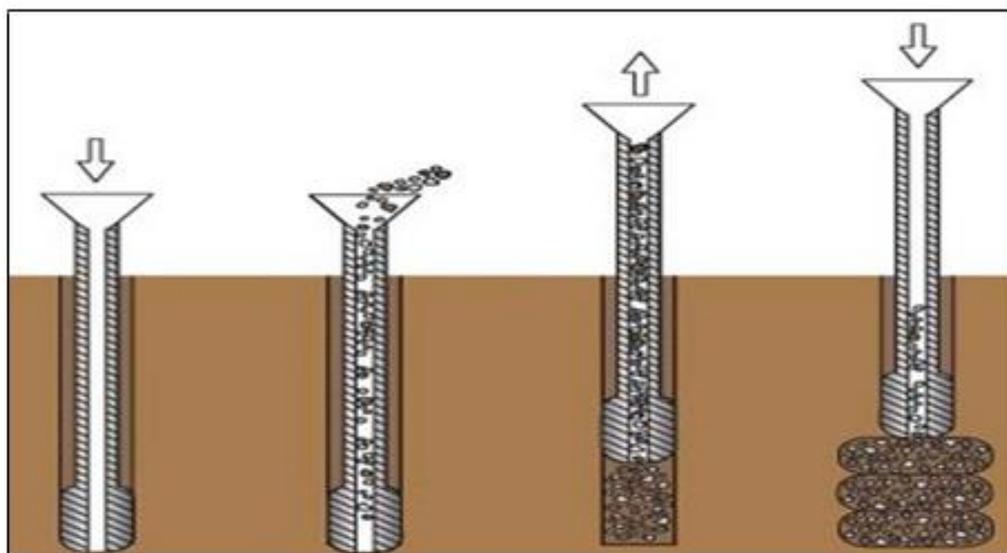
1. Definición de orden de instalación de las pilas. Puede trabajarse en varios frentes.
2. Barrenado en cada punto, de tal manera de aflojar el terreno para posteriormente introducir el mandril hueco.
3. Ubicación de la máquina con mandril apisonador en el punto de barrenado.
4. Apoyar el mandril de la máquina, donde se construirá la pila en cuestión.
5. Alimentar de grava el embudo ubicado en la parte superior del mandril hueco usando un manipulador telescópico.
6. Bajar el mandril en el punto barrenado.
7. Verificar con un ayudante que la grava fluya de forma continua por el mandril.
8. Paralelamente al paso anterior, retirar el alimentador de material o manipulador telescópico.

9. Inicio de la hinca del mandril en el suelo a mejorar hasta la profundidad considerada en el proyecto de mejoramiento.
10. De ocurrir rechazo debe anotarse para posterior evaluación.
11. Continuar la alimentación de grava a través del embudo para la construcción de la pila. Repetir este paso hasta la finalización de la construcción de la pila.
12. Levantar el mandril unos 90 centímetros y dejar caer grava por dentro, luego compactar verticalmente hasta formar capas compactadas de 30 cm de espesor final.
13. Posicionar la máquina apisonadora en otro elemento a instalar.
14. Al terminar una jornada de trabajo, se debe dejar el mandril apisonador en posición vertical apoyado en suelo firme.
15. Al finalizar la de todas las pilas y antes de colocar la capa de transferencia, la plataforma de trabajo debe ser compactada y nivelada con un rodillo vibratorio pesado u otro equipo que cumpla con el mismo objetivo.

A continuación, se muestran unas figuras de la secuencia constructiva:

Figura 6.3

Secuencia constructiva de las pilas de agregado compactado (tipo 1)



Nota. Referencia Emin Geoestructuras (2021)

Figura 6.4

Secuencia constructiva de las pilas de agregado compactado (tipo 1)



Nota. Referencia Emin Geoestructuras (2021)

Figura 6.5

Compactación final de plataforma con rodillo vibratorio (imagen referencial)



Los equipos mínimos necesarios para la construcción de las pilas de agregado compactado son los siguientes:

- ✓ Máquina con Mandril Apisonador.
- ✓ Excavadora con aditamento perforador.
- ✓ Equipos de carguío.

La primera máquina, debe ser de tipo excavadora de 35 a 45 toneladas de peso operacional, que lleva acoplada un martillo vibratorio. El martillo sostiene al mandril, permitiendo el vibrado y carga vertical suficiente para hincarlo y lograr la compactación vertical requerida para conformar las pilas, que deben alcanzar un diámetro construido de 61 centímetros aproximadamente.

Figura 6.6

Máquina con mandril apisonador para secuencia tipo 1 (imagen referencial)

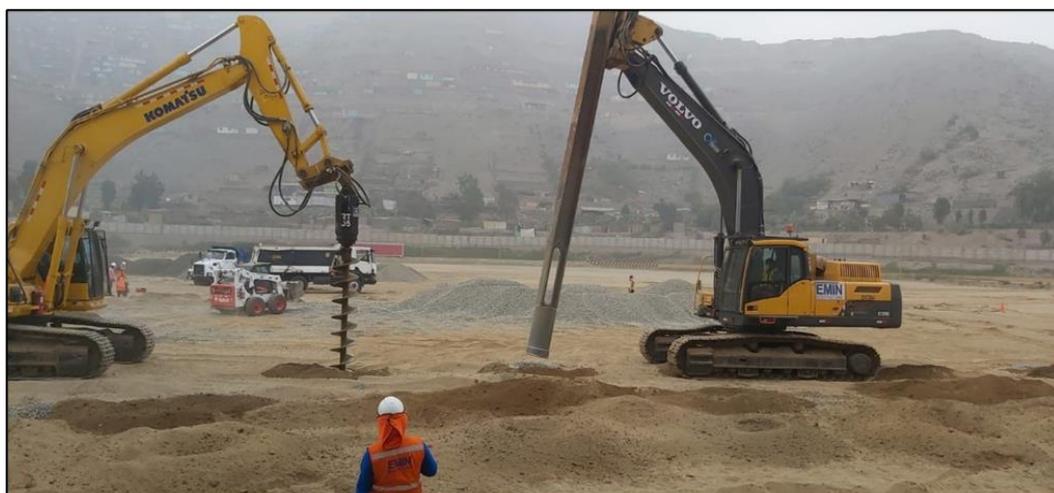


Figura 6.7

Máquina con mandril apisonador para secuencia tipo 2 (imagen referencial)

**Figura 6.8**

Barrenado previo a la instalación de pilas de agregado compactado



La finalidad del pre barrenado es soltar el suelo del estrato correspondiente a la plataforma de trabajo y posibles lentes de suelo de mayor resistencia, lo cual facilita el hincado del mandril apisonador en el terreno a densificar. Para el pre barrenado se utiliza una excavadora de 20 a 35 toneladas de peso operacional, a la cual se conecta un elemento perforador.

Figura 6.9

Foto de la excavadora con aditamento para extraer material



Respecto a los equipos de carguío, se requieren para acopiar el material extraído de la perforación y depositar grava en el punto donde se construirá la pila de agregado compactado.

Figura 6.10

Equipo de carguío (imagen referencial)



Figura 6.11

Vista del tope de una pila de agregado compactado construida



6.4 CONTROL DE CALIDAD DE LAS PILAS DE AGREGADO COMPACTADO

A continuación, se detallan las pruebas requeridas para controlar la calidad en la ejecución de las pilas de agregado compactado en este proyecto.

6.4.1 Prueba de Módulo de Rigidez

Para la dimensión del almacén se considera adecuado ejecutar cuatro pruebas de módulo de rigidez. Se está considerando de 1 prueba cada 1200 pilas de agregado compactado, las cuales deben ejecutarse desde el nivel de la plataforma de trabajo, esto es desde el nivel previsto para la instalación de las pilas.

En estas pruebas que se ejecutan tomando como referencia los lineamientos generales de la norma ASTM D-1143, se considera lo siguiente:

- ✓ Los elementos no se llevan a la falla.

- ✓ El elemento es sometido al 150% del esfuerzo de compresión de diseño.
- ✓ Se obtiene la curva esfuerzo de compresión aplicado en el tope del elemento versus su deformación. Así mismo se obtiene la curva correspondiente a la parte inferior del elemento.

A continuación, se muestran los incrementos y decrementos a los que se someterá la pila de agregado compactado durante el ensayo.

Tabla 6.1

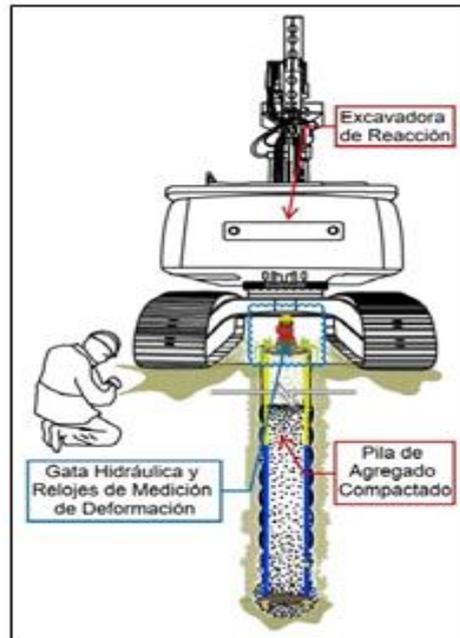
Detalle de cargas de compresión aplicadas durante la prueba de módulo de rigidez

| Itinerario típico de una prueba de módulo de rigidez | | | |
|---|--|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Incremento de carga | Esfuerzo aplicado (% del Esfuerzo Máximo de Diseño) | Duración mínima (minutos) | Duración máxima (minutos) |
| Colocación | < 9 | N/A | 60 |
| 1 | 17 | 15 | 60 |
| 2 | 33 | 15 | 60 |
| 3 | 50 | 15 | 60 |
| 4 | 67 | 15 | 60 |
| 5 | 83 | 15 | 60 |
| 6 | 100 | 15 | 60 |
| 7 | 117 | 60 | 240 |
| 8 | 133 | 15 | 60 |
| 9 | 150 | 15 | 60 |
| 10 | 100 | 5 | N/A |
| 11 | 66 | 5 | N/A |
| 12 | 33 | 5 | N/A |
| 13 | 0 | 5 | N/A |

En la siguiente imagen se muestra un esquema de la prueba utilizando una excavadora para la reacción.

Figura 6.12

Esquema de la prueba de módulo de rigidez usando excavadora de reacción (referencial)



Nota. Referencia Emin Geoestructuras (2021)

El sistema de reacción para la ejecución de la prueba puede realizarse con equipos pesados de la propia obra (excavadora por ejemplo), con una viga de reacción, o con cualquier otro medio que sea capaz de desarrollar la compresión necesaria para realizar el ensayo. El sistema de reacción a emplear en el proyecto es determinado por el Diseñador de Pilas de Agregado Compactado previo al inicio de la instalación de los elementos en campo.

A continuación, se indican las características principales de la prueba de módulo:

- ✓ El esfuerzo de compresión máximo aplicado en el tope de la pila de agregado compactado es de 150% del mayor esfuerzo de compresión teórico determinado durante la fase de diseño.
- ✓ Todos los incrementos de carga se aplican por un tiempo mínimo de 15 minutos, con excepción del séptimo incremento, que se aplica hasta

que la velocidad de deflexión sea menor a 0.01 pulgada por hora, siendo la duración máxima de una hora.

- ✓ Todos los decrementos de carga se hacen durante 5 minutos como mínimo.

Figura 6.13

Viga de contrapeso en una prueba de módulo de rigidez



Figura 6.14

Plato de carga instalado bajo la viga en una prueba de módulo de rigidez



6.4.2 Prueba de Estabilización Estática

La prueba de estabilización se ejecuta inicialmente en las 5 primeras pilas instaladas. Posteriormente, se realizan en forma aleatoria a razón de 1 prueba cada

10 pilas de agregado compactado, esto es 10% del total de pilas. Además esta prueba también debe ejecutarse en las pilas donde se lleva a cabo la prueba de módulo de rigidez.

El procedimiento de la prueba de estabilización es el siguiente:

1. Una vez alcanzada la profundidad de la pila se mide la presión de trabajo. Luego, se apaga el efecto dinámico de la máquina y se realiza una marca de referencia en el mandril.
2. Sobre la capa ya compactada y sin subir el mandril, se aplica durante 15 segundos una nueva compactación a la misma presión.
3. Se vuelve a marcar el mandril y se mide la diferencia con la anterior marca. Esa distancia se relacionará con el CST de la prueba de módulo de rigidez.

CONCLUSIONES

Los asentamientos del suelo natural esperados por efecto de las cargas a transmitir por la losa de piso de la nave de secos del centro de distribución exceden del asentamiento máximo permisible por las estructuras, que es de 1 centímetro. La carga estimada es de 6 Ton/m² en condiciones estáticas.

Por lo indicado, es necesario buscar una solución geotécnica que permita transmitir las cargas al terreno sin exceder el asentamiento tolerable indicado.

En este trabajo de tesis se ha buscado desarrollar una técnica moderna de mejoramiento de suelos que comprende la incorporación de pilas de grava compactada para reducir los asentamientos totales y diferenciales, la cual resulta económica en comparación de alternativas de solución tradicionales como lo son los reemplazos de suelos y cimentaciones profundas con pilotes.

Se llevaron a cabo los cálculos de asentamiento para la condición reforzadas utilizando diferentes metodologías habiéndose determinado un diseño que permitiera mitigar los asentamientos esperados y satisfacer los requerimientos estructurales.

Se ha considerado que la losa de cimentación diseñada por el especialista en estructuras para recibir las cargas de los racks acumulativos no presenta esfuerzos de tracción.

La solución de diseño planteada consiste en emplear en instalar pilas de agregado compactado de 0,61 metros de diámetro espaciadas 2,40 m centro a centro en un arreglo cuadrangular, siendo el espesor de suelos por mejorar de 4,10 m.

Sobre el suelo mejorado se debe colocar una capa de repartición de 0,40 m de espesor, conformada por material granular seleccionado, colocado en dos capas de 0,20 m de espesor, cada una de las cuales debe compactarse al 95% de la máxima densidad seca del ensayo proctor modificado.

Para la condición sísmica dado a las características del refuerzo no se espera la ocurrencia de asentamientos diferenciales, por cuanto la mayor parte de la carga será tomada por las pilas de agregado compactado que presentan características uniformes.

Se ha considerado en los cálculos un módulo de rigidez de las pilas de agregado compactado 250 libras por pulgada cúbico al aplicarse el 100% del esfuerzo de diseño. Este valor debe verificarse in situ mediante pruebas de módulo de rigidez. Este tipo de pruebas se considera en el presente caso entre las actividades de control de calidad.

RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta que para el diseño se ha considerado como premisa que el módulo de rigidez de las pilas de agregado compactado es de 250 libras por pulgada cúbica al aplicárseles el 100% del esfuerzo, para garantizar el diseño deben efectuarse pruebas de módulo de rigidez in situ, una vez instaladas las pilas. Es recomendable que estas pruebas se lleven a cabo en lugares con perfil de suelos conocido desfavorable, esto es cerca de las perforaciones con resultados menos favorables y que se verifique que el módulo de rigidez sea mayor o igual al valor indicado. En caso contrario sería necesario instalar las pilas más cerca una de otra.

Además de las pruebas de módulo, como control de calidad deben llevarse a cabo pruebas cualitativas de estabilización estática CST (que miden el asentamiento de la grava durante su instalación). Estas pruebas deben ejecutarse inicialmente en la pila de prueba donde se hará la primera prueba de módulo de rigidez y en las 10 primeras pilas de agregado compactado instaladas. Luego, es recomendable llevar a cabo estas pruebas en forma aleatoria en un mínimo de 10% de la totalidad de los elementos instalados.

Ambas actividades descritas deben considerarse como control de calidad del sistema de mejoramiento del terreno.

A pesar de la efectividad comprobada de este sistema en diferentes obras tanto a nivel mundial como en el Perú, en forma similar que otros sistemas de mejoramiento del terreno considerados como soluciones intermedias entre una cimentación superficial y una cimentación de tipo profunda con pilotes, o como sistemas de reforzamiento de suelos, no se encuentran mencionados en la Norma Técnica de Edificación Peruana E050: Suelos y Cimentaciones (2018), siendo uno de los objetivos de este trabajo de investigación promover la inclusión de las técnicas de mejoramiento de suelos.

Se sugiere a otros estudiantes de posgrado continuar con esta línea de investigación y en particular, con la metodología de reforzamiento de suelos evaluada en el presente trabajo, con la finalidad de determinar su aplicación para otros problemas geotécnicos y otros tipos de suelos.

Se sugiere también, al Comité Técnico de Normalización E050: Suelos y Cimentaciones que evalúe la incorporación de mejoramientos de suelos en la norma. A la fecha se vienen llevando a cabo en el Perú diferentes metodologías de reforzamiento, sin embargo, en la norma no se mencionan.

REFERENCIAS

- Alva, J. (2012). *Diseño de cimentaciones superficiales*. (3ª ed). Perú: Instituto de la Construcción y Gerencia.
- Bielza, A. (1999). *Manual de técnicas de mejora del terreno*. Madrid: UD Proyectos. ETSIM Madrid.
- Braja M., D. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (4ta. ed.). México: Publicado en inglés por Cengage Learning © 2013.
- Bravo Decker, J. (2016). *Mejoramiento masivo de subsuelos mediante pilas de agregado apisonado (RAP) en suelos tipo F según la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015*. [Tesis, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (Ecuador)]. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/5>.
- Cisneros García, G. B. (2016). *Análisis comparativo en el diseño de pilotes y pilas de agregado compactado*. [Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería (Perú)]. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/4524>.
- Crespo Villalaz, C. (2005). *Mecánica de suelos y cimentaciones* (5ta ed.). México: Limusa.(Emin Geoestructuras, 2021)
- Emin Geoestructuras. (2021). *Especificaciones técnicas para mejoramiento de suelos EG_IPE-275_I_ET_B*.
- Fallas Barrantes, F. (2020). *Valoración y diseño de cuatro obras geotécnicas: cimentación de los aerogeneradores de un proyecto eólico con el método Geopier, estabilización de una excavación en suelo con una estructura enterrada conformada por pilotes, sostenimiento primario para la construcción de una ventana tipo antena en un túnel en ambiente sedimentario y sostenimiento primario con arcos reticulares de acero en un túnel en rocas blandas*. [Tesis de Maestría, Universidad de Costa Rica]. <https://hdl.handle.net/10669/82834>.
- Fattah, M. Y., Al-Neami, M. A., & Shamel Al-Suhaily, A. (2017). *Estimation of bearing capacity of floating group of stone columns*. *Engineering Science and*

- Technology, an International Journal*, 20(3), 1166–1172.
<https://doi.org/10.1016/J.JESTCH.2017.03.005>.
- Fox, N. S., & Cowell, M. J. (1998). *Geopier foundation and soil reinforcement manual*. Geopier Foundation Company, Blacksburg, Va.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. (6ª ed.). México: McGraw-Hill.
- Huamán Quillahuamán, M. A. (2018). *Mejoramiento del suelo arcilloso utilizando Geoestructuras de Geopier para una edificación en la Avenida Juan Lecaros frente al Estadio Municipal De Puente Piedra, 2018*. [Tesis, Universidad César Vallejo (Perú)]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.5>.
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodriguez, A. (1973). *Mecánica de suelos*.
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodriguez, A. (2005). *Mecánica de suelos Tomo II Teoría y aplicación de la mecánica de suelos*. México: Limusa.
- Lawton, E. C., y N. S. F. (1994). *Settlement of structures supported on marginal or inadequate soils stiffened with short aggregate piers. Geotechnical Specialty Publication No. 40: Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments*, ASCE, 2, 962-974.
- López, P. L. (2004). *Población, muestra y muestreo. Punto Cero*, 09(08), 69-74. Recuperado en 05 de julio de 2022, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-02762004000100012&lng=es&tlng=es.
- Martinelli, M. (2021). *Estudio de Mecánica de Suelos Hipermercado Tottus SA. Ampliación nave de secos, Centro de Distribución Huachipa, Lurigancho – Chosica, Lima*. M y M Consultores srl. Estudio No M5237.
- Moreno, J. (2019). *Tecnologías Geopier para la mejora de suelos y cimentaciones intermedias. Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente*, (272), 36-41.
- Ñaupas, H., Mejía, E., Novoa, A. & Villagomez, A. (2014). *Metodología de la*

Investigación Cuantitativa – Cualitativa y Redacción de la Tesis. Colombia, Bogotá: Ediciones de la U.

Peck, R., Hanson, W., & Thornburn, T. H. (2007). *Ingeniería de cimentaciones*. México: Limusa.

Plascencia Olivares, E. A., & Obregón Vilca, M. E. (2021). *Propuesta de utilización de un sistema de pilas de grava compactada para el mejoramiento de un suelo arenoso en el distrito de San Juan Bautista*. [Tesis: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)]. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/1075>.

Praxis. (2021). *Informe Estructural PRX-MD-2021-001 Memoria descriptiva Ampliación almacén autoportante Centro de Distribución Tottus Huachipa*.

Pulido-Chavez, A. C., & Rueda-Melo, O. I. (2019). *Instrumentación y control de asentamientos para obras de ingeniería civil con la ayuda de la geomática*.

Reglamento Nacional de Edificaciones, Norma Técnica de Edificación E 050: Suelos y Cimentaciones (2018). Lima, Perú.

Reyes Morales, A. H. (2020). *Mejoramiento de suelos granulares mediante el uso de columnas de grava*. [Tesis: Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/17367>.

Roberts, J. N. (2017). *Field evaluation of large-scale, shallow ground improvements to mitigate liquefaction triggering*. <https://doi.org/10.15781/T26M33M12>.

Romana Ruiz, M. (2004). *Criterios de elección de los métodos de mejora del terreno. Simposio sobre Geotecnia Ambiental y Mejora del Terreno. 8vo Simposio Nacional de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica*. Valencia, España.

Soletanche, B. (n.d.). *Guía técnica*.

Suárez, J. (2009). *Deslizamientos. Tomo I: Análisis Geotécnico*. España: Universidad Industrial de Santander.

- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- Trejos Villalobos, J. A. (2020). *Diseño de cuatro soluciones geotécnicas: mejoramiento de un terreno licuable mediante columnas de grava compactadas, estabilización de un talud mediante suelo cosido, diseño de pilotes apoyados en rocas blandas y mejoramiento de un terreno licuable mediante compactación dinámica*. [Tesis de maestría: Universidad de Costa Rica]. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/80440>
- Valderrama, S. (2013). *Pasos para Elaborar Proyectos de Investigación Científica*. (2ª ed.). Lima: San Marcos.
- Valdiviezo Sandoval, K. J. (2019). Uso de columnas de grava compactada para aumentar la capacidad portante del suelo en la avenida Sanchez Cerro entre la avenida Chulucanas y avenida Mártires de Uchuraccay, ubicada en el distrito de Piura – provincia de Piura – departamento de Piura. *Universidad Nacional de Piura / UNP*. <http://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/1939>
- White, D. J., Gaul, A. J., & Hoevelkamp, K. (2003). Highway applications for rammed aggregate pier in Iowa soils. Final Rep., Iowa DOT TR-443, Ames, Iowa.
- Wissmann, K.J. y Fox, N. S. (2000). Design and Analysis of Short Aggregate Piers Used to Reinforce Soils for Foundation Support. *Proceedings, Geotechnical Colloquium, Technical University Darmstadt, Germany*.

APÉNDICES

1. MATRIZ SE CONSISTENCIA

ENUNCIADO: MEJORAMIENTO DEL TERRENO CON PILAS DE GRAVA COMPACTADA PARA REDUCIR ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES EN UN CENTRO DE DISTRIBUCIÓN EN HUACHIPA – LIMA 2022

| PROBLEMA | OBJETIVOS | HIPÓTESIS | VARIABLES E INDICADORES | METODOLOGÍA |
|--|---|--|--|---|
| INTERROGANTE PRINCIPAL ¿Se podría mejorar el terreno de fundación del almacén del CD ubicado en Huachipa 2022 mediante la incorporación de pilas de grava compactada para reducir los asentamientos diferenciales? | OBJETIVO GENERAL Analizar el mejoramiento de suelos con pilas de grava compactada para reducir los asentamientos diferenciales del terreno de fundación del almacén del CD 2022 ubicado en Huachipa - Lima | HIPÓTESIS GENERAL La incorporación de pilas de grava compactada mejora el terreno de fundación del almacén del CD ubicado en Huachipa 2022 para reducir los asentamientos diferenciales. | Variable dependiente: Terreno de fundación Variable independiente: Pilas de grava compactada | Tipo de investigación: Aplicada Enfoque: Cuantitativo Diseño: Experimental Ámbito de estudio: |
| INTERROGANTES ESPECÍFICAS ¿Se pueden estimar los asentamientos diferenciales a partir de las propiedades mecánicas del suelo de fundación del almacén del CD? | OBJETIVOS ESPECÍFICOS Estimar los asentamientos diferenciales por efecto de las cargas de los racks a partir de las propiedades mecánicas del suelo de fundación del almacén del CD. | HIPÓTESIS ESPECÍFICAS | Variable de interés: Asentamientos diferenciales | CD Tottus Huachipa Población: Área terreno almacén 24,000 m ² Muestra: 21 perforaciones con SPT cada 1 m |
| ¿Qué metodologías de mejoramiento de suelos reducen los factores de riesgo por los asentamientos diferenciales generados en el terreno de fundación del almacén del CD? | Evaluar las metodologías de mejoramiento de suelos que reducen los factores de riesgo por los asentamientos diferenciales en el terreno de fundación del almacén del CD. | Las metodologías de mejoramiento de suelos reducen los factores de riesgo por los asentamientos diferenciales en el almacén del CD. | Variable dependiente: Asentamientos diferenciales Variable independiente: Metodología de mejoramiento del terreno | Técnicas de recolección de datos: Campo: registro del perfil del suelo (observación). Ensayos SPT Laboratorio: Granulometría, Límites de Atterberg, Compresión, Pesos unitarios |
| ¿Se puede reducir los asentamientos diferenciales con la incorporación de pilas de grava compactada en el suelo de fundación del almacén del CD? | Reducir los asentamientos diferenciales con la incorporación de pilas de grava compactada en el suelo de fundación del almacén del CD. | La incorporación de pilas de grava compactada en el suelo de fundación del almacén del CD previene la ocurrencia de asentamientos diferenciales. | Variable dependiente: Asentamientos diferenciales Variable independiente: Pilas de grava compactada | Instrumentos: Equipos de pruebas in situ Equipos de laboratorio |

3. FORMATOS REGISTRO DATOS LABORATORIO

| ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO | | | |
|---|---------------------|----------------------------------|----------------------|
| Fecha de Ensayo: | Resp. del ensayo: | Norma: | |
| DATOS BÁSICOS (Aplicando ASTM D2487-11, Anexo X3 y X4) | | DATOS COMPLEMENTARIOS | |
| FRACCIONES | PESOS HÚMEDOS (g) | % DE HUMEDAD | PESOS SECOS (g) |
| MATERIAL > N°4 | | | |
| MATERIAL < N°4 | | | |
| ¿La muestra fue sometida a proceso de cuarteo? | | | |
| ¿Material oreado? | | | |
| ¿Peso verificado? | | | |
| IDENTIFICACIÓN DE TARA | | | |
| PESO DE TARA | | | |
| PESO HÚMEDO DE FRACCIÓN PARA LAVADO + TARA (g) | | | |
| PESO SECO POSTERIOR A LAVADO + TARA (g) | | | |
| PESO SECO POSTERIOR A LAVADO NETO | | | |
| HUMEDAD DE FRACCIÓN | | | |
| DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA | | | |
| COLOR DE LA MUESTRA: | | FORMA DE PARTÍCULAS: | |
| NATURALEZA: | | DUREZA DE LAS PARTÍCULAS: | |
| ENSAYO | | | |
| Tamiz | Pesos Retenidos (g) | % Retenido | % Retenido Acumulado |
| 4" | | | |
| 3" | | | |
| 2" | | | |
| 1 1/2" | | | |
| 1" | | | |
| 3/4" | | | |
| 3/8" | | | |
| N° 4 | | | |
| N° 10 | | | |
| N° 20 | | | |
| N° 40 | | | |
| N° 60 | | | |
| N° 140 | | | |
| N° 200 | | | |
| FONDO | | | |
| | | CÁLCULOS COMPLEMENTARIOS | |
| | | PESO INICIAL TOTAL SECO (g): | |
| | | PESO SECO DE FRACCIÓN < N°4 (g): | |
| | | HUMEDAD PROPORCIONAL (%): | |
| | | EFICIENCIA DE LAVADO (%): | |
| | | ERROR DE TAMIZADO DE FRACCIÓN | |
| | | COMPOSICIÓN DEL MATERIAL | |
| | | BOLONERIA (%) | |
| | | FRACCIÓN GRUESA (%) | |
| | | Grava (%) | |
| | | Arena (%) | |
| | | FRACCIÓN FINA (%) | |
| OBSERVACIONES | | REVISADO POR: | |
| | | | |
| | | FECHA: | |

| LÍMITES DE CONSISTENCIA DEL SUELO | | |
|-----------------------------------|-------------------|------------------------|
| Fecha de Ensayo: | Resp. del ensayo: | Norma: ASTM D4318-17e1 |

PREPARACIÓN DEL ESPÉCIMEN

| | | | |
|-----------------|---|--|------------------|
| Húmeda | Lavado en tamiz N°40 | | AGUA DE MEZCLADO |
| Secado al aire | Tamizado seco en tamiz N°40 | | Destilada |
| Secado en horno | Empujado mecánicamente a través del tamiz N°40 | | Desmineralizada |
| | Mezclado en capsula y partículas de arena removidas | | Otra |

EQUIPO EMPLEADO

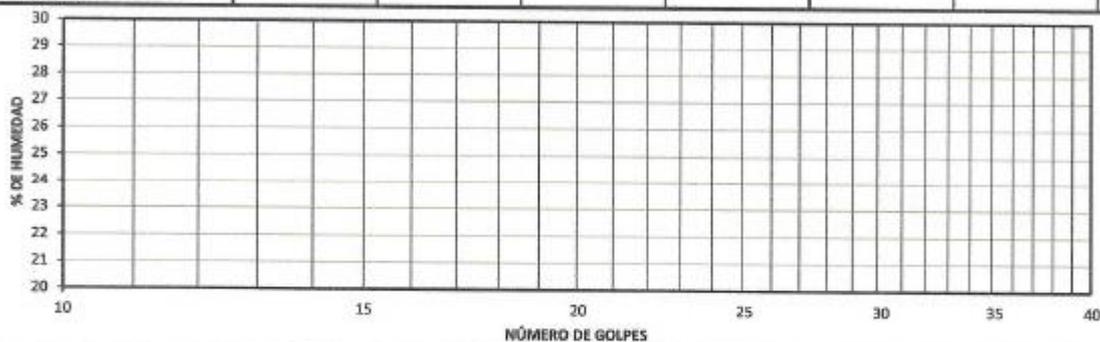
| | | |
|--------------------------------|-------------------|----------------|
| Límite plástico | Equipo Casagrande | Ranurador ASTM |
| Enrolado manual | Manual | Metálico |
| Aparato para enrolado mecánico | Motorizado | Plástico |

DESCRIPCIÓN VISUAL DE LA MUESTRA

| |
|--|
| |
|--|

ENSAYO

| | LÍMITE LÍQUIDO - MÉTODO A | | | | LÍMITE PLÁSTICO | | | |
|---------------------------------------|---------------------------|--|--|--|-----------------|--|--|--|
| | | | | | | | | |
| Numero de Golpes | | | | | | | | |
| Identificación de Recipiente | | | | | | | | |
| Peso de Recipiente (g) | | | | | | | | |
| Peso de Suelo Húmedo + Recipiente (g) | | | | | | | | |
| Peso de Suelo Seco + Recipiente (g) | | | | | | | | |
| Peso de Agua (g) | | | | | | | | |
| Peso de Suelo Seco (g) | | | | | | | | |
| Humedad (g) | | | | | | | | |



| | | |
|----------------|-----------------|-----------------|
| LÍMITE LÍQUIDO | LÍMITE PLÁSTICO | ÍNDICE PLÁSTICO |
|----------------|-----------------|-----------------|

OBSERVACIONES

| | |
|--|---------------|
| | REVISADO POR: |
| | FECHA: |

