



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTABILIZACIÓN DE TALUD EN SUELO SUCEPTIBLE A LICUADO
EMPLEANDO COLUMNAS DE GRAVA**

Línea de investigación:

Construcción Sostenible y Sostenibilidad Ambiental del Territorio

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autor:

Seguil Flores, Henry Isidro

Asesor:

Aybar Arriola, Gustavo Adolfo

Código ORCID 0000-0001-8625-3989

Jurado:

Cancho Zúñiga, Gerardo Enrique

Arevalo Vidal, Samir

Madrid Saldaña, Cesar Karlo

Lima - Perú

2023



ESTABILIZACIÓN DE TALUD EN SUELO SUCEPTIBLE A LICUADO EMPLEANDO COLUMNAS DE GRAVA

por Henry Seguil Flores

Fecha de entrega: 16-jun-2023 12:25p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2117402691

Nombre del archivo: 1A_SEGUIL_FLORES_HENRY_TITULO_2023-antiplagio.docx (3.65M)

Total de palabras: 14043

Total de caracteres: 72236

ESTABILIZACIÓN DE TALUD EN SUELO SUCEPTIBLE A LICUADO EMPLEANDO COLUMNAS DE GRAVA

INFORME DE ORIGINALIDAD

27%

ÍNDICE DE SIMILITUD

24%

FUENTES DE INTERNET

10%

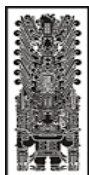
PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	6%
2	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	5%
3	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	4%
4	www.ptolomeo.unam.mx:8080 Fuente de Internet	2%
5	Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Trabajo del estudiante	1%
6	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
7	oa.upm.es Fuente de Internet	1%
8	Ramirez Ramirez Axel. "Metodos de mejoramiento vibratorio para mitigar los efectos de licuacion", TESIUNAM, 2002	<1%



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ESTABILIZACIÓN DE TALUD EN SUELO SUCEPTIBLE A LICUADO

EMPLEANDO COLUMNAS DE GRAVA

Línea de Investigación:

Construcción Sostenible y Sostenibilidad Ambiental del Territorio

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

Seguil Flores, Henry Isidro

ASESOR:

Aybar Arriola, Gustavo Adolfo

Código ORCID: 0000-0001-8625-3989

JURADO:

Cancho Zúñiga, Gerardo Enrique

Arevalo Vidal, Samir

Madrid Saldaña, Cesar Karlo

Lima - Perú
2023

Dedicatoria

Esta tesis se lo dedico a mi querida familia y muy en especial a mi amada madre, ella que siempre está a mi lado, en los buenos y malos momento de mi vida. más en la época de mi vida universitaria.

Ahora madre puedes decir a mi abuelita que ya le cumpliste con lo que te pidió seguro ella también estará muy feliz, y discúlpame madrecita por la demora en la presentación de la tesis.

Familia, mil gracias sé que este logro también es de ustedes y objetivo cumplido.

Agradecimiento

A la Universidad Nacional Federico Villarreal,
mi prestigiosa Alma Máter, por instruirme tanto
académica como éticamente en esta noble profesión que
es la Ingeniería Civil.

INDICE

ESTABILIZACIÓN DE TALUD EN SUELO SUCEPTIBLE A LICUADO

EMPLEANDO COLUMNAS DE GRAVA.....	1
RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
I. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 Descripción y formulación del problema.....	12
1.2 Problemas específicos	13
1.3 Antecedentes.....	13
1.3.1 Antecedentes internacionales	13
1.3.2 Antecedentes nacionales.....	15
1.3. Objetivos	17
1.3.1. Objetivo general	17
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	17
1.4. Justificación e importancia	17
1.5. Hipótesis.....	18
II. MARCO TEÓRICO	19
2.1. Columnas de grava	19
2.2. Concepto y teoría	19
2.3. Historia de columna de grava	19
2.4. Procesos de aplicación de columna de grava.....	19
2.5. Tipos de aplicación.....	20
2.6. Ventajas y desventajas.....	20
2.7. Estabilización de talud.....	21
2.8. Mejora de estabilización de talud.....	21
2.9. Métodos de mejoramiento de suelos	21
2.9.1. Mezclas	21
2.9.2. <i>Precargas</i>	26
2.9.3. <i>Inyección de compactación</i>	27
2.9.4. Inclusiones rígidas	28
2.9.5. Jet Grouting	30
2.9.6. Compactación dinámica	31
2.9.7. Mejoramiento por vibrado	33

2.10.	Columnas de grava o vibrosustitución	35
2.11.	Que técnicas se aplicara para el mejoramiento de suelos.....	37
2.11.1.	Condición del suelo	37
2.11.2.	Características del proyecto	37
2.11.3.	Perímetro del proyecto	37
2.11.4.	Tiempo de plazo para la construcción y precio.....	37
III.	MÉTODO	39
3.1.	Tipo de investigación	39
3.2.	Diseño de la investigación	39
3.3.	Población y muestra.....	40
3.3.1.	Población	40
3.3.2.	Muestra	40
3.4.	Variables	40
3.5.	Técnicas.....	41
3.5.1.	Descripción de los instrumentos.....	41
3.5.2.	Validez y confiabilidad de los instrumentos.....	41
3.5.3.	Técnicas para el procesamiento y análisis de los datos	42
3.5.4.	Análisis de la zona en estudio	42
IV.	RESULTADOS	44
4.1.	Consideraciones previas	44
4.2.	Estudios de mecánica de suelos y sondeos	49
4.3.	Análisis de licuación.....	55
4.4.	Diseño de Columnas de Grava – Seed & Booker (1977)	56
4.5.	Resultados descriptivos	67
V.	DISCUSION DE RESULTADOS.....	70
VI.	CONCLUSIONES.....	74
VII.	RECOMENDACIONES	78
VIII.	BIBLIOGRAFÍA.....	79
ANEXO A:	MATRIZ DE CONSISTENCIA	83
ANEXO B:	CIMENTACIÓN PROFUNDA CON PILOTES.....	86
ANEXO C:	TIEMPOS DE EJECUCIÓN DE LOS DOS MÉTODOS	90
ANEXO D:	PLANOS.....	94
ANEXO E:	FOTOS.....	102
ANEXO F:	SONDEOS (SGR5-01 AL AGR5-06)	105

ANEXO G: ANÁLISIS DE LICUACIÓN.....	111
ANEXO H: ANÁLISIS DE LICUACIÓN.....	119
ANEXO I: ANÁLISIS DE LICUACIÓN	126
ANEXO J: ESTABILIZACIÓN DE ESTRATOS DE ARENA POTENCIALMENTE LICUABLE.....	133
ANEXO K: DISEÑO DE COLUMNAS DE GRAVA	139
ANEXO L: EQUIPOS	144
ANEXO M: CUADRO DE VARIABLES.....	150

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mezcla de suelo	22
Figura 2. Mezcla con cal a granel - Mezcla de cal en forma de lechada	24
Figura 3. Aplicación del suelo – cemento con escarificador	25
Figura 4. Estabilización del suelo con asfalto.....	26
Figura 5. Terraplenes de carga.....	27
Figura 6. Equipo de inyección	28
Figura 7. Empleo de inclusiones rígidas	29
Figura 8. Empleo de Jet Grouting	30
Figura 9. Aplicación de la técnica	31
Figura 10. Trabajos de compactación dinámica	32
Figura 11. Equipo para trabajos de vibro compactación	34
Figura 12. Equipo de vibroflotación	35
Figura 13. Drenes de arena y grava	36
Figura 14. Resumen de los diferentes métodos de mejoramiento de suelos que se utiliza habitualmente	38
Figura 15. Planta del puerto del Callao y áreas de trabajo de remodelación del Puerto	42
Figura 16. Planta y sección de talud a evaluar, mejorar y estabilizar	43
Figura 17. Geometría de la columna de grava	57
Figura 18. Diagrama de diseño de columna de grava	58
Figura 19. Número de ciclos equivalentes Vs magnitud de sismo	59
Figura 20. Espectro de aceleración	60
Figura 21. Correlaciones para E_s y m_v , en función de $N(SPT)$	61
Figura 22. Incremento de la presión de poros/presión efectiva - inicial vs. número de ciclos	62

Figura 23 Instalación de columnas de grava en el amarradero N° 5	67
Figura 24 Columnas de grava de diámetro 0.50 y 0.80	75
Figura 25 Distribución geométrica de la malla, indicando el área de influencia de cada columna de grava	76

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. FoS (Factor de seguridad) contra licuefacción vs. Exceso residual de ratio de presión de poro	46
Tabla 2. Coordenadas - cotas y profundidades	50
Tabla 3 Parámetros usados para el diseño de columnas de grava.....	62
Tabla 4. Cuadro comparativo de resultados.....	63
Tabla 5. Ángulo de fricción equivalente calculado por PILOTES TERRATEST....	65
Tabla 6. Análisis costos unitario directo de columnas de grava	66
Tabla 7. Comparación del grado de estabilización	67

RESUMEN

La presente investigación se tuvo como objetivo analizar el efecto del empleando columnas de grava en la estabilización de talud en suelo susceptible a licuado. El estudio encargado por el Concesionario APM Terminals. Ubicado Puerto del Callao - sector norte - muelle 5. Para llevar a cabo el tipo de investigación aplicada, de un enfoque cuantitativa, nivel explicativo y con un diseño no experimental, transversal y retrospectivo. La población es el conjunto para la obtención de datos para el investigador. La muestra es el subconjunto de la población. La técnica que se utilizo fue el análisis documental. La tabla 7 se presentan los resultados: cuando se aplica el método de columnas de grava, la capacidad portante se incrementó un 44.45%. El terreno se mitigo el riesgo de licuefacción debido a que el facto de seguridad aumentó y es mayor que 1, cuando se aplicó el método esto significó un incremento del 84.13%. Se observó que la aplicación del método el SPT tuvo una variación de un 73%. El terreno cuando se aplica el método, esto mejoro el asentamiento diferencial con una variación del 40.95%. Se mejoró el terreno en los siguientes puntos: Capacidad Portante, Factor de seguridad (F_s), SPT y el asentamiento diferencial, en algunos casos tuvo un incremento y disminución como ya se comentó en la tabla 7. El cual mejor el terreno en un 68.13%. El método desarrollado por Seed & Booker en 1977, es usado para el diseño de las columnas de grava. Se recomienda al ministerio de vivienda, construcción y saneamiento introducir en la normativa de mecánica de suelos, la aplicación del método de columnas de gravas. De los datos del Anexo C, se obtuvo los siguientes resultados: las columnas de grava tienen porcentajes de ahorro económicamente de un 44.04% y en el número de días 89.52%.

Palabras clave: Suelo susceptible a licuado, columnas de grava, estabilización de talud.

ABSTRACT

The objective of this investigation was to analyze the effect of the approach of a methodology using gravel columns in the stabilization of the slope in soil susceptible to liquefying. The study commissioned by the APM Terminals Concessionaire. Located Puerto del Callao - north sector - pier 5. To carry out the type of applied research, with a quantitative approach, explanatory level and with a non-experimental, cross-sectional and retrospective design. The population is the set for obtaining data for the researcher. The sample is the subset of the population. The technique used was documentary analysis. Table 7 shows the results: when the gravel column method is applied, the bearing capacity increased by 44.45%. The terrain mitigated the risk of liquefaction because the safety factor increased and is greater than 1, when the method was applied this meant an increase of 84.13%. It was observed that the application of the SPT method had a variation of 73%. The terrain when the method is applied, this improved the differential settlement with a variation of 40.95%. The terrain was improved in the following points: Bearing Capacity, Safety Factor (F_s), SPT and differential settlement, in some cases it had an increase and decrease as already mentioned in table 7. Which improved the terrain by 68.13 %. The method developed by Seed & Booker in 1977 is used for the design of gravel columns. It is recommended that the Ministry of Housing, Construction and Sanitation introduce the application of the gravel column method into the soil mechanics regulations. From the data in Annex C, the following results were obtained: the gravel columns have economic savings percentages of 44.04% and 89.52% in the number of days.

Keywords: Soil susceptible to liquefaction, gravel columns, slope stabilization.

I. INTRODUCCIÓN

La presente tesis tiene por finalidad evaluar, verificar y solucionar el problema del terreno donde se realizará la pendiente del talud una vez dragado, en la zona de pescadores terminando el Muelle 5 del proyecto de Modernización del Puerto del Callao. La empresa concesionaria del Puerto del Callao APM Terminals, encargó a Royal Haskoning B. V. Maritime and Waterways, la realización del proyecto de remodelación del puerto del Puerto del Callao, el cual redactó un Expediente Técnico para el mejoramiento del terreno a base de investigaciones y cálculos.

El contratista por su parte realizó otras investigaciones geotécnicas; es así como se llegó a la propuesta de mejora de suelo mediante columnas de grava. Se revisó la información disponible en el Expediente Técnico y también la más reciente realizada por el contratista para verificar la necesidad de mejoramiento del terreno mediante el análisis de licuación de suelos con las perforaciones geotécnicas disponibles y los cálculos con el sismo de diseño.

Una vez determinada la ocurrencia del fenómeno de licuación se verifica la disposición de las mallas para la solución de columnas de grava para cumplir con los requerimientos de las especificaciones técnicas.

1.1 Descripción y formulación del problema

El concesionario del Puerto del Callao APM Terminals, como parte de modernización del Puerto para mejorar su capacidad de servicio, tiene como uno de sus objetivos ampliar el Muelle 5 para la adquisición y ubicación de nuevas grúas pórticos, así como permitir el acceso de barcos con mayor capacidad, para este trabajo se requiere realizar un dragado, dejando un talud de bajo de la ampliación del amarradero a proyectarse también en la zona final denominado la zona de pescadores. El perfil geotécnico del futuro talud nos muestra una capa

de arena existente hasta una profundidad de 12 m. el cual puede ser susceptible a licuefacción ante un evento sísmico, lo que afectaría la estabilidad de la pendiente del talud.

¿Cómo ayuda empleando columnas de grava a la estabilización de talud en suelo susceptible a licuado?

1.2 Problemas específicos

- ¿Cómo ayuda empleando columnas de grava a mejora la capacidad portante del terreno en suelos blandos?
- ¿Cómo ayuda empleando columnas de grava a mitigar la licuefacción en suelos blandos?
- ¿Cómo ayuda empleando columnas de grava a disminuir el asentamiento diferencial en suelos blandos?

1.3 Antecedentes

1.3.1 Antecedentes internacionales

Monsalve (2018) tuvo por objetivo comparar la aplicación de una técnica económica de pilotes pre excavados de hormigón armado y columnas de grava, la cual se aplicó en el “puente Bypass Lumaco”, Chile. A continuación, veremos algunos datos recogidos de esta tesis.

En conclusión, en el proceso constructivo de columnas de grava tendremos un ahorro de 56.79%, un menor tiempo de un 37.25% y como resultado el mejoramiento del suelo se incrementa en un 51% en la tensión sísmica admisible.

Carvajal (2020) en este trabajo de investigación, Costa Rica el cual se evaluó la zona costera y en la cual se aplicó las columnas de gravas. Mejoro la capacidad portante del suelo, mitigar el riesgo de licuación que se observó en este suelo arenoso. Siendo más económico que los pilotes. El diseño y se aplicó las columnas de grava se mediante aplicación de (SEED&BOOKER

1976). El cual plantea una figura geometría triangular, así puedan estar equidistante entre columnas, de esta manera se pueda disipar presiones de poros en cargas dinámicas.

Bautista & Mayorga (2018) En este análisis las columnas de grava, presenta un comportamiento mecánico entre el suelo y la grava por la interacción de los agregados y el suelo. Se diseñó un modelo experimental, de las columnas de grava, así se analizó el asentamiento y el tiempo de consolidación del suelo. Para esto se realizó un estrato sin mejorar y uno mejorado con las columnas de gravas, y en ambos casos fueron sometidos a la misma carga axial, el cual fue ayudado por un software con el fin de comparar los datos. El resultado dio que los asentamientos aplicando las columnas de gravas es menor en un 25% respecto a los suelos sin mejorar. En conclusión, la columna de gravas mejora el asentamiento en suelos blancos saturados. Bucaramanga, Colombia

Polo (2013) este proyecto es un estudio geológico-geotécnico con el objetivo de construir el muelle pesquero al sur de España. Para lo cual la parte de la geotecnia solicito 4 sondeos “in situ”. A continuación, se tuvo dos alternativas y para saber la mejor opción se utilizó el software GeoSloe, así saber si la cimentación del muelle: se aplicaría las siguientes, muelle vertical sin columnas de grava y muelle vertical con columnas de grava. Se observó en los resultados una mejor eficiencia con columnas de grava gracias a diferentes factores técnicos, estructurales y un ahorro económico. De la cual se pudo obtener las dimensiones de las columnas de grava: tiene un 1m de diámetro, 12m de longitud, una malla de 5 filas con un espaciamiento de 2.5m entre columnas. La cual mejora la estabilidad, el asentamiento y la capacidad portante del muelle.

Núñez (2017) esta técnica de vibro-sustitución, es más utilizada en suelos finos, y se introduce columnas de gravas por capas hasta llegar a la superficie, Se forma todo una malla de columnas de gravas y que esto permite reducir la compresibilidad, darle mayor rigidez y resistencia al corte. De esta técnica podemos evaluar como el método de vibro-sustitución con columnas de

gravas que además influyen en los parámetros como el diámetro y rigidez de la columna, propiedades de la grava. Todo esto ayuda a reducir el asentamiento en terraplenes y construir en suelos finos.

1.3.2 Antecedentes nacionales

Reyes (2020) En la presente investigación de estudio se realizó el diseño y proceso constructivo y así poder obtener los costos y tiempos más óptimos. La metodología de suelos como son columnas de grava y la cimentación profunda mediante pilotes. A continuación, veremos los costos de cada uno. Tomando en cuenta el diseño y el proceso constructivo de las columnas de grava se realizó un análisis de precios unitarios en metros lineales. En la cual resulto un costo de \$ 247 516.04 dólares americanos. Tomando en cuenta el diseño y el proceso constructivo de la metodología de una cimentación profunda mediante pilotes se realizó un análisis de precios unitarios en metros lineal. En la cual resulto un costo de \$ 606 233.32 dólares americanos. De estos mejoramientos de suelos y para este caso en particular, en el proceso constructivo de la aplicación de columnas de grava tendremos un ahorro con respecto al uso de pilotes el cual es de \$ 358 717.28 dólares americanos. Además, se obtendrán el mejoramiento geotécnico, el cual se requiere para la construcción de la estructura.

Salazar (2017) En todo el litoral peruano de nuestra costa esta bordeado por grandes cantidades de arena y en la cual se dificulta la construcción de cimentaciones para una edificación importante, por su baja capacidad portante en casos de sismos y la cual generan la licuefacción. En el mejoramiento de suelos y en especial la aplicación de columnas de gravas, aún que no es muy difundida en nuestro país. Pero si nos da brinda grandes beneficios como el incremento de la capacidad portante de terreno, la reducción de asentamiento y disminución del riesgo de licuefacción. Teniendo en cuenta este problema, la tesis hablara de manera general de todos los

métodos que existen en mejoramiento de suelo, en este caso en particular se hablara de las columnas de grava y de su diseño y su proceso constructivo.

Falla (2021) En este proyecto de tesis, se busca mitigar la licuefacción y estabilizar el suelo en este caso el área a intervenir que es muelle 5E, puerto del callao. Mediante la aplicación de columnas de gravas. Utilizando el método de SEED&IDRISS, se trabajó con un sismo de 8.5 grados, con la utilización de sondeos en campo de SPT. Para la resolver el problema de licuefacción de suelos, se aplicó las columnas de gravas, utilizando los métodos de diseño de SEED&BOOKER, el cual nos brinda diferentes ventajas como el aumento de la capacidad portante del suelo, drenar el agua existente y disminuir los asentos diferenciales. El fin, de la presente tesis tiene como objetivo de mostrar la comparación de la mitigación de la licuefacción del suelo del puerto del callao, antes y después se aplicó la técnica de columnas de grava. Mediante el número de SPT y saber en cuanto mejoro el terreno.

Poves (2017) En las inclusiones regidas en este caso las columnas de gravas, en la cual nos ayuda a trabajar en suelos blandos así nos permite la construcción de edificaciones. Porque después de la aplicación de esta, nos presenta una mejor resistencia, rigidez y algunas mejoras en las propiedades de este suelo. Aplicando las columnas de grava se observó que es un buen método de mejoramiento de suelo por que reduce el asentamiento del suelo, y la redistribución de las cargas de los suelos. Se observó que asentamiento vario del 50% hasta un 85% claro esto será dado por el diseño del diámetro y separación de las columnas de grava. El cual acelera el proceso de consolidación.

Torres (2017) En la presente tesis se valoró, diseño y se ejecutó el mejoramiento de suelos del Muelle Norte Callao, utilizando columnas de gravas, se inició con la parte geotécnica la cual aplico 5 puntos de sondajes, como resultado, el primer estrato de 6.0 m de espesor “relleno y grava”, el segundo estrato de 5.0 m de espesor “arena limosa” y debajo de estos estratos hay “conglomerado de lima”, viendo estos resultados se advierte el riesgo del fenómeno de

licuefacción. En el estudio se presenta los diferentes métodos de mejoramiento utilizados a nivel mundial, los cuales nos ayuda a reducir el asiento diferencial, resistencia y permeabilidad, pero uno de ellos nos reduce el potencial de licuación y minimiza los asentamientos. Es llamado “Método de columnas de grava”, que además posee una técnica constructiva optima y eficaz. El método de columnas de gravas tienes dos procesos constructivos como son: Vibrodesplazamiento y Vibrosustitución, su utilización depende de la presencia de finos. Y en este caso puntual por el alto contenido de finos e inestabilidad se optó por el método de “Vibrosustitución por vía seca”. El diseño de las columnas de grava fue realizado por SEED&BOOKER(1976), y que toma como parámetro el sismos de diseño. De aquí obtenemos el diámetro y la separación entre las columnas de grava.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Analizar el efecto de la aplicación empleando columnas de grava en la estabilización de talud en suelo susceptible a licuado.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar el funcionamiento de la aplicación empleando columnas de grava para mejorar la capacidad portante del terreno en suelos blandos.
- Analizar el funcionamiento de la aplicación empleando columnas de grava para mitigar la licuefacción en suelos blandos.
- Analizar el funcionamiento de la aplicación empleando columnas de grava para disminuir del asentamiento diferencial en suelos blandos.

1.4. Justificación e importancia

La importancia y la necesidad del empleo de columnas de grava se debe a la necesidad de estabilizar una pendiente de talud dragada con la finalidad que en el amarradero 5 dentro del Puerto del Callao, debido a que el perfil geotécnico indica que contiene una capa de arena

susceptible a licuado. Realizando esta estabilización se conseguirá que el Puerto del Callao pueda ofrecer un mayor servicio. Por ello es importante, si se ha de construir sobre suelos inestables, realizar previamente la mejora y la estabilización apropiada.

1.5. Hipótesis

Hipótesis general

- Existe efecto significativo de la aplicación empleando columnas de grava en la estabilización de talud en suelo susceptible a licuado.

Hipótesis específicas:

- Existe un efecto significativo en la aplicación empleando columnas de grava para mejorar capacidad portante en suelos blandos.
- Existe un efecto significativo en la aplicación empleando columnas de grava para mitigar la licuefacción del terreno en suelos blandos.
- Existe un efecto significativo en la aplicación empleando columnas de grava para disminuir el asentamiento diferencial en suelos blandos.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Columnas de grava

2.2. Concepto y teoría

Según Poves (2017). Este método de mejoramiento de suelo aplicado en frecuentemente en terrenos blandos. Las columnas de grava también surgen al intentar aplicar la vibro compactación clásica de suelos granulares a suelos cohesivos.

Según, Cimentada (2009). La utilización de columnas de grava en suelos blandos, tiene varias disposiciones geométricas de construir estas mallas pueden ser triangulares, cuadradas, hexagonales, etc. Tomando una de estas formas, mejora los suelos blandos. El proceso consiste en la introducción de un vibrado que penetra el terreno por medio de agua o aire y es rellenada con grava de manera vertical la cual se compacta y por capas. Como resultado. Esta columna de grava mejora o refuerzan el terreno.

2.3. Historia de columna de grava

Según, Reyes (2020) El mejoramiento de terreno mediante las columnas de grava aún se sigue utilizando y actualizando en su diseño y procedimiento constructivo. Este método nace en la década de 1950, la empresa Johann Keller fue la primera que utilizo esta técnica de la vibropactacion en suelos de permeabilidad reducida.

2.4. Procesos de aplicación de columna de grava

Según, Cimentada (2009). Los procesos de aplicación para la construcción de columnas de grava son los siguientes.

- Penetración del vibrador: cuando el vibrador está en el punto indicado previamente, este penetra el terreno por su peso propio, la energía de la vibración y el lanzamiento a presión de agua.
- Ensanche de la perforación: por la acción a presión del agua esto remueve y arrastre los finos existentes, lo cual provoca el ensanchamiento o la perforación inicial.

- **Sustitución:** cuando la vibradora alcanza la profundidad requerida o un estrato más compacto esto es rellenado con grava hasta la parte superior, por capas de 50cm, la cual es compactada, por medios de movimientos ascendentes y descendentes del vibrador.
- **Terminado:** el relleno lo determina la resistencia del material ya compactado por el vibrador. El proceso de ascenso y relleno llega al terminar cuando está en la cota superior.

2.5. Tipos de aplicación

Según, Cimentada (2009). Este método tiene dos tipos de aplicaciones para columnas de grava, que son: la vibrosustitución, o también llamada vía húmeda; y el vibrodesplazamiento o vía seca. Respecto a las aplicaciones en campo ambos métodos son muy similares, solo difieren el aporte de aire comprimido y el agua a presión.

2.6. Ventajas y desventajas

según Falla (2021) la utilización de este método nos brinda grandes beneficios en el mejoramiento de terrenos como son los siguientes:

- Aumento de la resistencia al corte
- Aumento del módulo de rigidez
- Aumento de la permeabilidad
- Aumento a la capacidad portante del suelo
- Estabilidad del deslizamiento
- Reducción de asentamientos
- Aceleración del proceso de consolidación
- Disminución del riesgo a licuefacción
- Permite construcción sobre relleno

Según Maldonado (2022) desventajas del uso de método de columnas de grava como son:

- Poca información relevante del tema

- Maquinaria y personal calificado para la construcción
- Diseño empírico

2.7. Estabilización de talud

Según Villalobos (2020) la estabilidad de talud se estudia realizando una comparativa entre las fuerzas estabilizadoras y fuerzas desestabilizadoras de una gran masa de terreno. A este planteamiento se considera como Métodos de Equilibrio Limite. Por qué es la operación entre las fuerzas estabilizadoras y las fuerzas desestabilizadoras y es conocido como Factor de Seguridad.

2.8. Mejora de estabilización de talud

En este caso se obtendrá la mejora de estabilización de talud, aplicando el método de columnas de grava debidamente diseñada, en la cual se tomó los datos en el campo. Y se coloca por diseño un diámetro, profundidad y espaciamiento entre ellas. Estas columnas son colocadas de manera uniforme y en puntos designados.

2.9. Métodos de mejoramiento de suelos

Se conoce como mejoramiento de suelos al proceso mediante el cual se someten éstos a cierto tratamiento, de modo que se mejoren sus propiedades físicas o de ingeniería para obtener un terreno firme, estable, capaz de soportar adecuadamente cargas y condiciones ambientales. En la etapa del estudio geotécnico de un proyecto de mejoramiento debe investigarse la naturaleza y propiedades de los suelos. El mejoramiento puede lograrse por varios procedimientos entre los que se incluyen los citados en los siguientes subincisos.

2.9.1. Mezclas

Este método se utiliza para mejorar un suelo mediante la combinación de los suelos con agentes estabilizadores.

Existen mezclas de suelos y mezclas con productos químicos, como enseguida se trata.

a) Mezclas de suelos

Este tipo de estabilización es de amplio uso.

Según Ortega (2008) Los suelos de grano grueso, como grava-arena, tienen una fricción interna alta, por lo cual soportar esfuerzos mayores; sin embargo, lo cual no hace que sean estables para ser usadas como material de base en una carretera, ya que al carecer de cohesión sus partículas se mueven libremente y con el paso de los vehículos pueden separarse.

Las arcillas, al contrario, tienen notoria cohesión y poca fricción, lo que provoca que pierdan estabilidad ante humedades altas. La mezcla adecuada de los dos tipos de suelo puede dar como resultado un material estable en el que se aprovecha la fricción interna de uno y la cohesión del otro. Sin embargo, la sola mezcla no logra producir los efectos deseados; se requiere además la compactación.

Figura 1

Mezcla de suelo



Fuente: SOILTAC SOIL PERÚ S.A.C.

b) Mezclas con productos químicos

Según Ortega (2008) es principalmente el uso de sustancias químicas que involucran la sustitución de iones metálicos y cambio en la constitución de los suelos involucrados en el proceso.

Se han usado gran número de productos químicos con este fin, la mayoría de ellos con resultados satisfactorios, pero requieren del estudio y asesoría de especialistas, tanto durante la etapa de diseño como de construcción.

- **Mezclas con cal**

Según Ortega (2008) La cal disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es relativamente económica. Los porcentajes que se utilizan varían normalmente del 2 al 6% con respecto al peso seco del material por mejorar.

Es recomendable no usar porcentajes mayores, ya que, aumenta ligeramente la resistencia hay un incremento en la plasticidad.

El mezclado puede realizarse en planta o en campo, obteniéndose mejores resultados en el primer caso. Puede agregarse en forma de lechada, a granel o en sacos (Fig.2). Si se agrega en forma de lechada, ésta se disuelve en el agua que se integra a la compactación.

Cuando se efectúa el mezclado en campo, el material por mejorar debe estar disgregado y acamellonado; se abre una parte y se le agrega la cal distribuyéndola en el suelo, para después hacer el mezclado en seco.

Se recomienda agregar una ligera cantidad de agua para evitar el polvo. Después se agrega el agua necesaria y se tiende la mezcla dándole un curado hasta de 48 horas, el cual consiste en mantener la superficie húmeda por medio de un rociado ligero.

Figura 2

Mezcla con cal a granel - Mezcla de cal en forma de lechada



Fuente: SOILTAC SOIL PERÚ S.A.C.

- **Mezcla con cemento Pórtland**

Según Ortega (2008) Se usa principalmente en suelos granulares (arenas y gravas finas). El cemento mezclado con el suelo mejora las propiedades mecánicas de éstos, dando como resultado la disminución de la relación de vacíos y de la plasticidad de los suelos, así como un aumento en su resistencia y durabilidad.

Figura 3

Aplicación del suelo – cemento con escarificador



Fuente: SOILTAC SOIL PERÚ S.A.C.

El suelo que se mezclará con cemento debe pulverizarse y esparcirse sobre la superficie para lograr la proporción adecuada de la mezcla.

Es conveniente hacer la distribución del cemento con equipo especializado (pulvimixer) para lograr un mezclado uniforme. También pueden usar discos rotatorios de arado hasta que se determine un mezclado total. La mezcla puede hacerse en seco o en húmedo.

La adición del agua debe ser uniforme en toda la zona, cuidándose de que no quede depositada en huecos. El curado se realiza con un riego de agua, en proporción de 0.5 a 1.0 l/m². Se pueden utilizar excavadoras, empujadoras, traíllas escarificadoras (motoescrepas), niveladoras rodillos vibradores, apisonadoras y rodillos lisos.

- **Mezclas con productos asfálticos**

Según Ortega (2008) En este tipo de estabilizaciones, las emulsiones asfálticas son las más usadas, ya que pueden emplearse con material triturado sin cohesión y no necesitan

altas temperaturas para hacer las maniobrables. Existen emulsiones de fraguado lento, medio y rápido.

Figura 4

Estabilización del suelo con asfalto



Fuente: SOILTAC SOIL PERÚ S.A.C.

La capa por mejorar debe estar completamente terminada. No se debe hacer la estabilización con mucho viento, temperaturas inferiores a 5° C o lluvia. La dosificación depende de la granulometría de los suelos.

2.9.2. Precargas

Según Beyk (2014) este método se aplica inicialmente una carga igual o superior de un terraplén y es aplicado usualmente en suelos blandos, esto produce una consolidación y aumento en la resistencia del terreno y una reducción de los asentamientos después de la construcción (Fig. 5).

En la ejecución de la carga y descarga en suelos blandos esto induce a deformaciones plásticas muchos mayores que las elásticas, así esta acción que se repite continuamente prepara al terreno para un comportamiento similar en las tensiones. Sin embargo, la precarga en campo, este proceso no puede repetirse más de una vez, porque implicaría un costo elevado.

Figura 5

Terraplenes de carga



Fuente: SOILTAC SOIL PERÚ S.A.C.

Por lo tanto, el fin de la precarga es la pre consolidación del suelo blando y aumentando su resistencia y la disminución de los asentamientos para cuando vuelva a ser cargado.

En todo este proceso de consolidación se disminuye el contenido de agua, la relación de vacíos y el coeficiente de permeabilidad, esto hace que se incremente la resistencia al corte, el módulo de compresibilidad y la resistencia a la penetración.

Según Pollán (2014) veremos los diferentes suelos que se pueden mejorar mediante el método de precargas son: arenas sueltas, arcillas blandas, limos orgánicos e inorgánicos, turbas, rellenos artificiales (materiales procedentes de dragado, rellenos hidráulicos, escombros y desechos industriales).

2.9.3. Inyección de compactación

Según Reyes (2020) en el presente son utilizadas para la compactación e impermeabilizante en rocas fracturadas y suelos porosos. Este método de inyección se utiliza mediante presiones, las cuales deben de ser monitoreadas, caso contrario podría ocasionar levantamientos en las superficies, movimientos de rocas o suelos blandos.

En la actualidad las inyecciones pueden ser: lechadas de partículas o suspensiones y lechadas sin partículas.

Los diferentes tipos de inyección son acordes a ciertas características y tipos de terrenos que se quiere mejorar. La granulometría del terreno determina las características adicionales al tipo de inyección a usar como aditivos y técnicas de ejecución.

Figura 6

Equipo de inyección



Fuente: GBC Cimentaciones. México.

2.9.4. Inclusiones rígidas

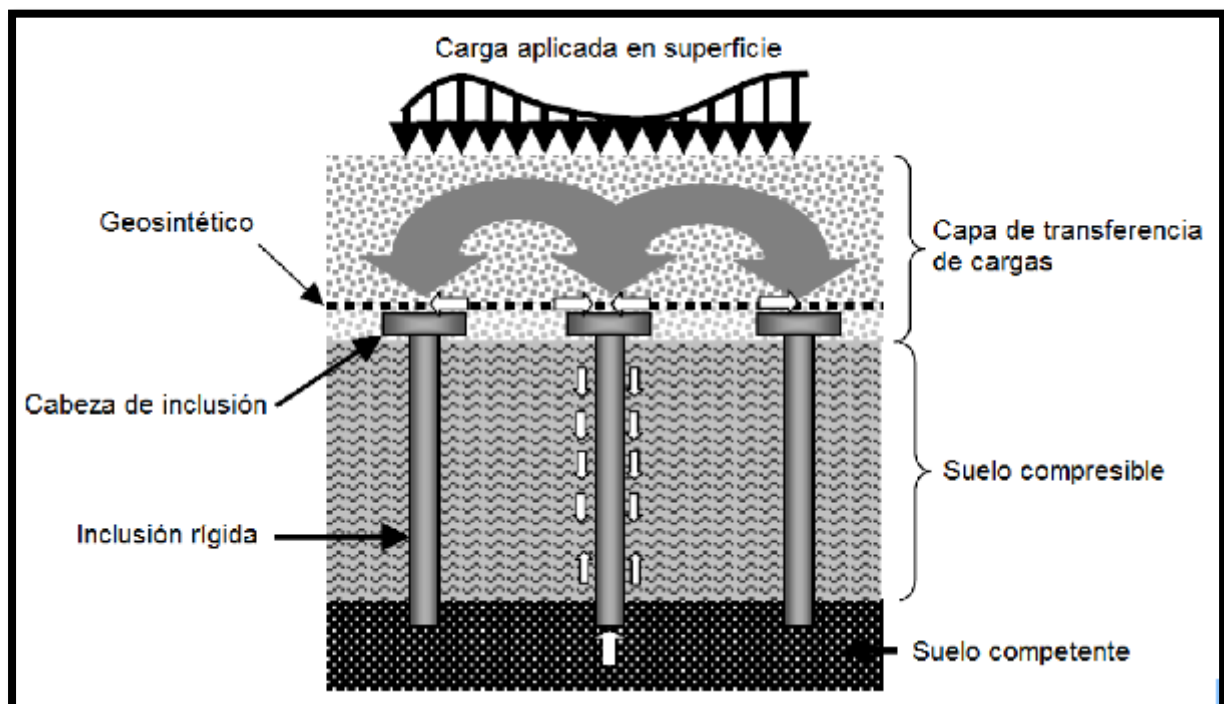
Según Gómez (2012) para las inclusiones rígidas desde el punto de vista económico y técnico son bien vistas. El cual tiene por objetivo poder cimentar rellenos de gran altura y estructuras con pesos elevados.

Este método tiene por característica principal la combinación de inclusiones construidas en estratos blandos y las transferencias de cargas colocadas entre la malla de inclusiones y la estructura. Las inclusiones rígidas son de diferentes tipos y construidas de diferentes métodos. La función principal de las inclusiones rígidas es transmitir la carga de la estructura y del propio terreno normal a un estrato más dura así podrá reducir los asentamientos y mejorar la estabilidad global de la cimentación.

El funcionamiento de las inclusiones rígidas que están colocadas en suelos blandos formando un en mallado y apoyadas o no sobre estratos duros. Sobre esta se aplica la capa de reparto de transferencia de cargas. El proceso de mecanismo de cizallamiento en esta capa asegura la distribución desigual de cargas entre las inclusiones rígidas y el suelo blando. Las características geotécnicas y geométricas de esta capa impactan en su eficacia en la transmisión de cargas.

Figura 7

Empleo de inclusiones rígidas



Fuente: Adaptación Jenck, 2005

2.9.5. Jet Grouting

Según Reyes (2020) Esta técnica de jet grouting consiste en la aplicación de lechada de cemento (agente cementante) a una alta presión y con una distribución radial esto causa la trituración de los suelos y mezcla con él. Este proceso es realizado a través de pequeñas toberas laterales, se expulsan cuando suben y rotan, con una velocidad controlada, así se forma una mezcla de suelo-cemento.

Figura 8

Empleo de Jet Grouting



Fuente: GBC Cimentaciones. México.

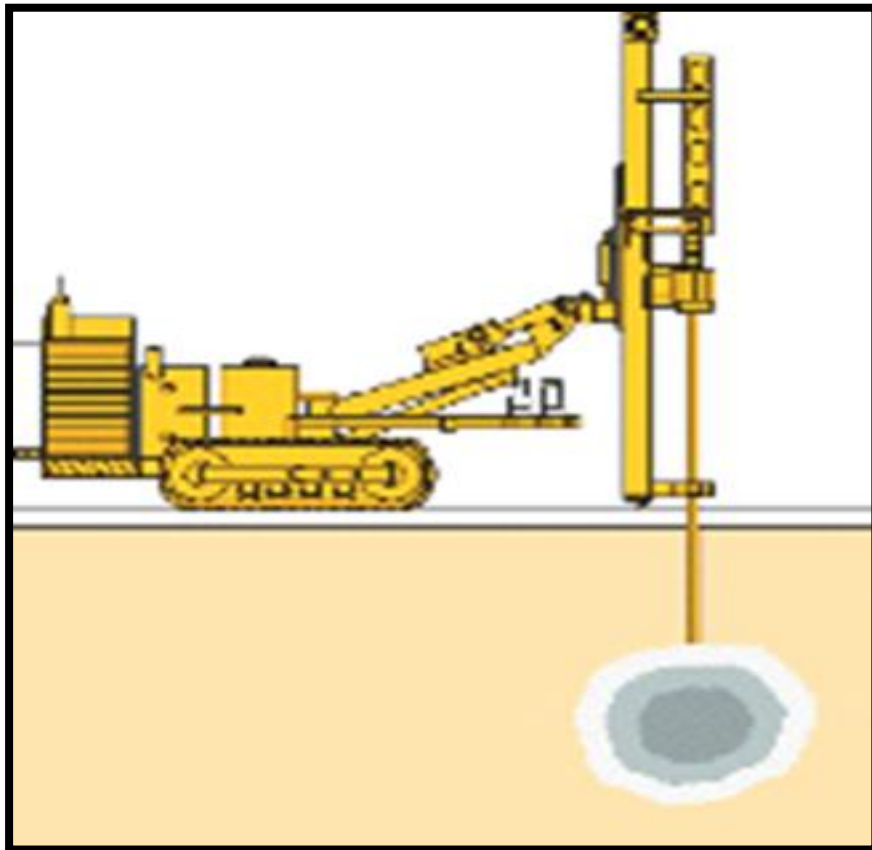
Características y aplicación de jet grouting y sus efectos en suelos a tratar son:

- Gracias a la compactación ocasionada por la expansión del terreno a causa de las inclusiones, causa una mejora del terreno.
- Eleva la resistencia del terreno y reduce el esfuerzo de corte cíclico, reduciendo el riesgo de licuefacción.

- No choca con la estabilidad de las estructuras existentes.
- Posea una gran variedad, por lo cual su aplicación se expande a diversas condiciones (diferentes tipos de suelos, estructuras y cargas).
- Aumento de la capacidad portante del suelo y el mejoramiento de los suelos.

Figura 9

Aplicación de la técnica



Fuente: GBC Cimentaciones. México.

2.9.6. Compactación dinámica

Según (Sopeña, 1992 citado en Zamora, 2014) este método consiste en golpear el terreno con una masa en caída libre, las cuales pueden llegar a pesar 40 tn y soltarlo de una altura de 40m.

Los repetidos golpes al terreno provocan una disminución del volumen de vacíos y la licuefacción del terreno, se crean vías de drenaje. El peso y la altura de la caída libre está relacionado con el espesor de las capas del suelo donde se impacta.

Antes de la compactación, el terreno deberá ser recubierto por una capa de material granular drenante de 0.5 a 1.0m de espesor para:

- Para fortalecer la estabilidad de la máquina.
- Previene un excesivo hundimiento de la masa.
- Sirve de drenaje al agua expulsada.

Para elevar y soltar la masa frecuentemente se utiliza una grúa clásica. Aunque en muchos casos se utiliza maquinaria que fue diseñada para la compactación dinámica.

Este método el cual consiste en una serie que se repite el golpe al terreno el cual se toma desde 2 días hasta varias semanas. Este método puede reducir favorablemente la compresibilidad del terreno y mejora su resistencia. Por lo cual los asentamientos producidos por el terraplén sean reducidos.

Figura 10

Trabajos de compactación dinámica



Fuente: GBC Cimentaciones. México.

2.9.7. *Mejoramiento por vibrado*

Entre los procedimientos de mejoramiento por vibración se encuentra la vibro compactación, la vibro flotación, la vibro sustitución y el vibro hincado cuyos aspectos relevantes son los siguientes:

a) Vibrocompactación

Según (Kirsh & Kirsh, 2010 citado en Reyes Morales, 2020) esta técnica es la compactación profunda básicamente en granulares sueltos, por medio de la vibración. Se aplica en suelos saturados, en las vibraciones ejecutadas consisten en que las partículas de arena y grava se reordenan en un estado más denso y asentamiento durante la liberación de presiones intersticiales.

Esta técnica consiste en la penetración de un equipo vibrador al terreno a una profundidad requerida así el terreno circundante se densifique por causa de la transmisión de energía vibrada y desplazamiento del suelo. En la figura 11 observamos el equipo que se usa para la ejecución de la vibrocompactación.

Según (Sobrecases, 2018 citado en Reyes Morales, 2020) por último, se requiere básicamente la aplicación del tratamiento que es la composición del terreno sea tal que este se comporte de forma drenada, con disipación de energía instantánea de esfuerzos intersticiales. Por ello el rango de aplicación de este método se ve limitado a suelos granulares limpios, con porcentajes de finos menores de 15%.

Para la construcción, se penetra el vibrador en el terreno por acción de su propio peso y chorros de agua. El agua es un componente importante en este proceso, y en terrenos secos reduce la fricción intergranular y favorece a la introducción del vibrador.

Cuando el vibrador llega a la profundidad requerida este se levanta en tramos de 0.6 a 1.20m. en estos casos también se utilizan los chorros de aguas laterales y gracias a esto se crea agujeros

y en los cuales es rellenan normalmente con arena. Esto se vibra por tramos y en un cierto tiempo que será de 1 a 2 minutos. Por ello causa un reacomodo en las partículas y una densificación por tramos.

Para finalizar, se extrae el vibrador el cual produce un cráter, el cual es relleno con arena limpia para luego compactarla hasta llegar a la superficie. Lista para la construcción.

Figura 11

Equipo para trabajos de vibro compactación



Fuente: SOILTAC SOIL PERÚ S.A.C.

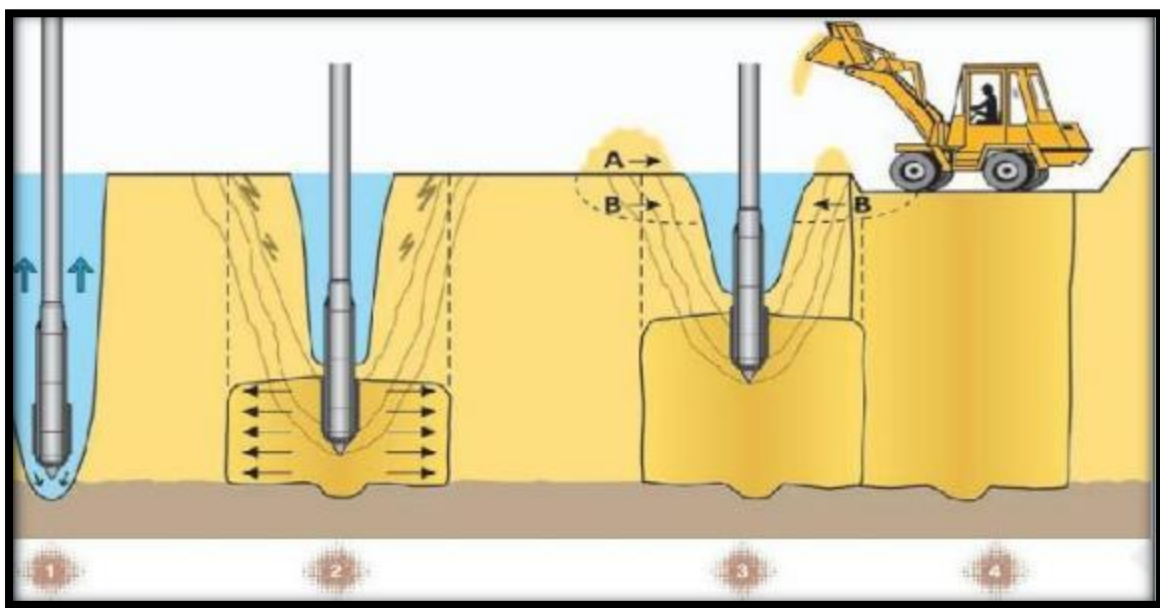
b) Vibroflotación

Según (Gonzales, 2008 citado en Poves, 2017) esta técnica de compactación dinámica. Se penetra el vibrador en el suelo así permite la densificación mediante la energía aportada en forma de vibración. se penetra el vibrador en el terreno por acción de su propio peso, a la vibración y al aporte de un chorro de aire o agua.

La técnica de vibroflotación se aplica en suelos arenosos y que tengan menos del 10% de finos, en caso contrario la energía del vibrador se disipa fácilmente y solo se obtendrá una compactación puntual. Si se realizara la compactación a grandes profundidades, resultaría más complicado debido a la presión del terreno y por lo tanto tendría que necesitar mayores cantidades de energía.

Figura 12

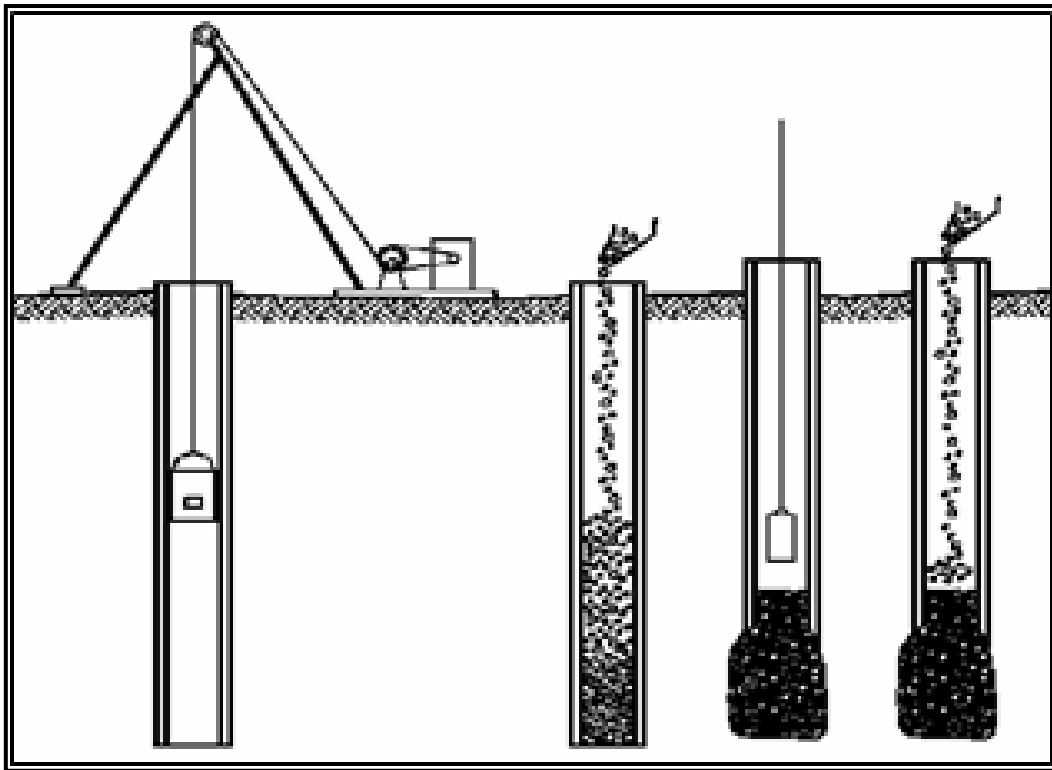
Equipo de vibroflotación



Fuente: KELLERTERRA

2.10. Columnas de grava o vibrosustitución

Según Zamora (2014) el método para apresurar la consolidación de los suelos blandos son las inclusiones verticales de grava, puede ser por zanjas o mediante columnas de grava, aplicadas por la técnica de vibroflotación, con la inclusión de grava y sustitución parcial del suelo. De esta manera se genera un refuerzo adicional al terreno.

Figura 13*Drenes de arena y grava*

Fuente: GBC Cimentaciones. México.

En terraplenes elevados que están encima de suelos blandos, se necesitan terrenos de mayor resistencia y la aplicación de columnas de grava es una de las mejores opciones de mejora de suelos, a la acción de la rigidización se produce la aceleración y la consolidación.

Las columnas de grava tienen dos métodos importantes que son:

- Vibrodesplazamiento o vibrocompactación por vía seca.
- Vibrosustitución o vibrocompactación por vía húmeda.

La vibrosustitución se aplica en suelos blandos cohesivos, relativamente impermeable, teniendo una resistencia al corte sin drenaje de 0.02 a 0.05 kg/cm². Si el nivel freático es alto o las paredes de perforación son inestables, estos terrenos son más fáciles de perforar con chorros de agua y que se inyectan a presión. En cambio, el otro método de Vibrodesplazamiento

se aplica en suelos cohesivos estables y no sensibles con la resistencia al corte sin drenaje de 0.03 a 0.06 kg/cm².

Según (Bielsa, 1999 citado en Zamora, 2014) los beneficios con el método de columnas de grava, son:

- Mejorar la capacidad portante del terreno.
- Reducir los asentamientos.
- Apresura el proceso de consolidación.
- Mejora la estabilidad ante el deslizamiento de terraplenes.

Descripción teórica Según Zamora (2014) el proceso consiste en la inclusión de un relleno granular para formar columnas densas de grava, las cuales se mezclan con el terreno natural y crean un sistema integrado, y la diferencia de rigidez provoca una redistribución en las tensiones aplicadas y esto se concentra sobre las columnas de grava. En consecuencia, se mejora la resistencia en conjunto bajando los asentamientos y haciendo que sean mas uniformes.

2.11. Que técnicas se aplicara para el mejoramiento de suelos

Por cual técnica debemos de optar y los criterios que debemos de considerar.

2.11.1. Condición del suelo

El tipo de suelo – nivel freático y suelos blandos

2.11.2. Características del proyecto

Carga puntual – distribuida

2.11.3. Perímetro del proyecto

Proximidad de estructuras sensibles – Limitación de espacio

2.11.4. Tiempo de plazo para la construcción y precio

Técnica estática – presupuestos

Figura 14

Resumen de los diferentes métodos de mejoramiento de suelos que se utiliza habitualmente

TURBA	ARCILLA	LIMO	ARENA	GRAVA
			MEZCLAS	
PRECARGA CON O SIN DRENES VERTICALES				
			INYECCION DE COMPACTACION	
INCLUSIONNES RIGIDAS				
	JET GROUTING			
			COMPACTACION DINAMICA	
			VIBROCOMPACTACION	
	COLUMNAS DE GRAVA			
SUSTITUCION DINAMICA				
	SOLL MIXING			

Fuente: Ing Hugo Egoavil y Ing. Victor Yepes

III. MÉTODO

3.1. Tipo de investigación

La presente investigación se realizó un estudio de tipo aplicada, de enfoque cuantitativa y nivel explicativo. Es aplicada según Esteban (2018) porque es basada en la investigación, donde se formula problemas o hipótesis de trabajo para resolver problemas hasta en la sociedad. bajo un enfoque cuantitativo según Hernández (2014) es progresivo y probatorio. Por lo tanto, cada paso es importante y no podemos saltarnos. En la cual resultan varios objetivos y preguntas de investigación, de estas preguntas se establecen hipótesis y determinan variables con el objetivo de probarlas, se cuantifican las variables en un determinado contexto, es cuantificable mediante el uso estadístico y como resultado obtenemos una variedad de conclusiones. Por lo tanto, el objetivo consiste en tratar un tema poco estudiado, además de usar variables para su desarrollo y entendimiento, dando así explicaciones a los eventos estudiados y generar soluciones para un buen comportamiento.

3.2. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación en la que se basa la presente tesis; no experimental, transversal y retrospectivo. no experimental según Risco (2020) porque no se manipularan las variables del investigador. Transversal según Risco(2020) se cuantifica una vez las característica, variables y con esas tomas se realizan los análisis; esto es un momento determinado. como pueden ser: exploratorios, descriptivos, correlativos y explicativos. Retrospectivo según Risco (2020) el objeto al ser estudiado causa un efecto en el presente y se busca la causa en el pasado. En los análisis descriptivos nos referimos a hechos que se realizaron el en pasado u que ahora son motivos de estudio.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

Arias (2020), una población es el conjunto en estudio de sujetos, infraestructura, equipos, herramientas e incluye material audiovisual. que poseen características específicas determinadas por el investigador según los objetivos que persigue, por lo tanto, el cual nos ayudará a enfocar la solución del problema; para este caso la población sería los suelos pobres susceptibles a licuado, delimitado en el suelo de la pendiente de talud al final del amarradero 5 del Puerto del Callao, el cual se deberá buscar alguna solución factible.

3.3.2. Muestra

Según (Carrillo, 2015) explica que la muestra es una parte o subconjunto de una población (...) que pone de manifiesto las propiedades de la población”. En este caso la muestra sería el diseño de la columna grava el cual estabilizara la pendiente del talud que se necesita estabilizar.

3.4. Variables

Los objetos utilizados como variables de estudio dentro de la investigación son aquellos que definen el diseño y procedimiento de las técnicas de mejoramiento de suelos.

La técnica de columnas de grava cuenta con distintas variables a estudiar, tales se mencionan como características del caso a estudiar.

Variable independiente

Columnas de Gravas.

Indicadores: geométrica (diámetro de la columna)

Variables dependientes

Estabilización de talud con suelo susceptible a licuado

Indicadores: tiempo, capacidad portante, mitigar la licuefacción y asentamiento diferencial

Técnicas de recolección de datos

3.5. Técnicas

El estudio usará el método de análisis documental, según Arias (2020) o también llamado análisis de documento el cual consiste en revisar lo que se realizó con el fin de obtener datos de dicho documento; por lo cual, el documento puede ser de origen primario y principales así permiten que el investigador obtenga información, y pueda presentar sus resultados y pueda finalizar los estudios.

3.5.1. Descripción de los instrumentos

El instrumento que se usará será la Observación documental, según (Sánchez, 2018 citado en Arias, 2020) esta técnica consiste en que el investigador observa y almacena la información de los sujetos u objetos a examinar sin involucrarse con ellos.

Bibliografías: Banco de datos, citas, fórmulas y experiencias realizadas con fines académicos para la realización del tema en mención.

Expediente Técnico Puerto del Callao: Resumen técnico donde cita los requerimientos, procedimientos y posibles soluciones para el desarrollo de la solución al problema.

Estudios de mecánica de suelos (EMS): Estudios de contenido y características físicas de un suelo, mediante recolección de una muestra según norma requerida.

Planos: Datos técnicos representados gráficamente que proveen de ubicación, detalles de diseño y procesos constructivos.

3.5.2. Validez y confiabilidad de los instrumentos

El caso en particular no realizara la validez y confiabilidad por ser un estudio retrospectivo de análisis de datos secundarios del pasado.

3.5.3. Técnicas para el procesamiento y análisis de los datos

Para el análisis e interpretación de datos se aplica estudios de laboratorio para el análisis de licuación del terreno, así como software especializado en ingeniería para el apoyo del diseño de la columna grava.

3.5.4 Análisis de la zona en estudio

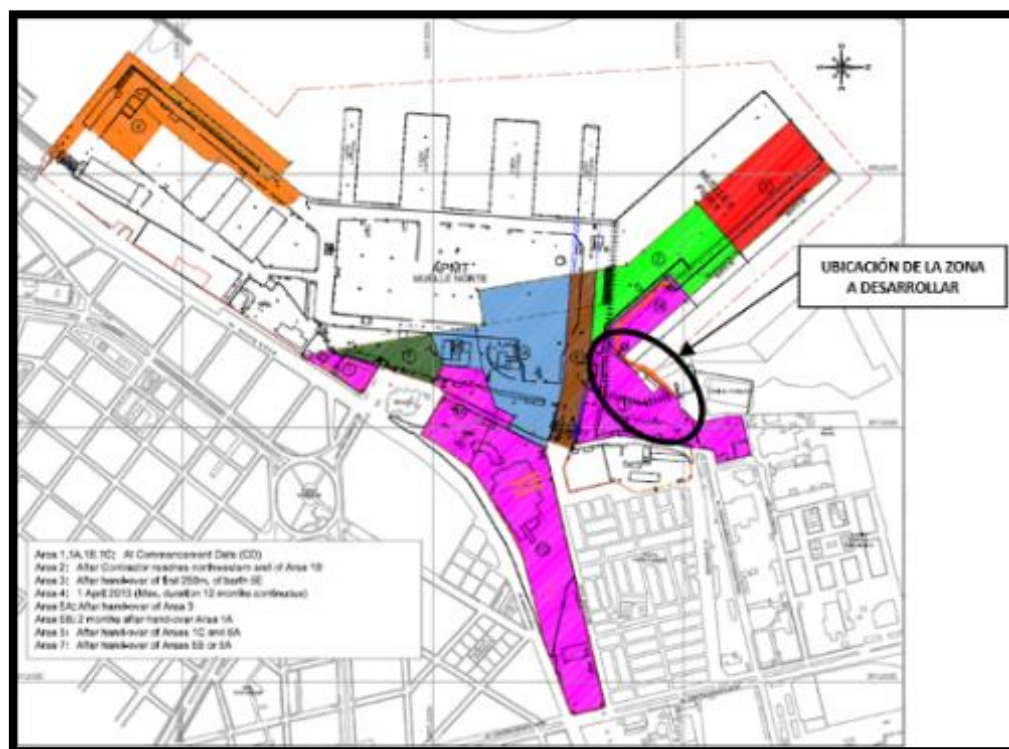
Ubicación

El Puerto del Callao está ubicado en el Distrito del Callao, Provincia Constitucional del Callao.

- Latitud: 8°21'29" S
- Longitud: 74°34'24" O
- Altura: 153 msnm.

Figura 15

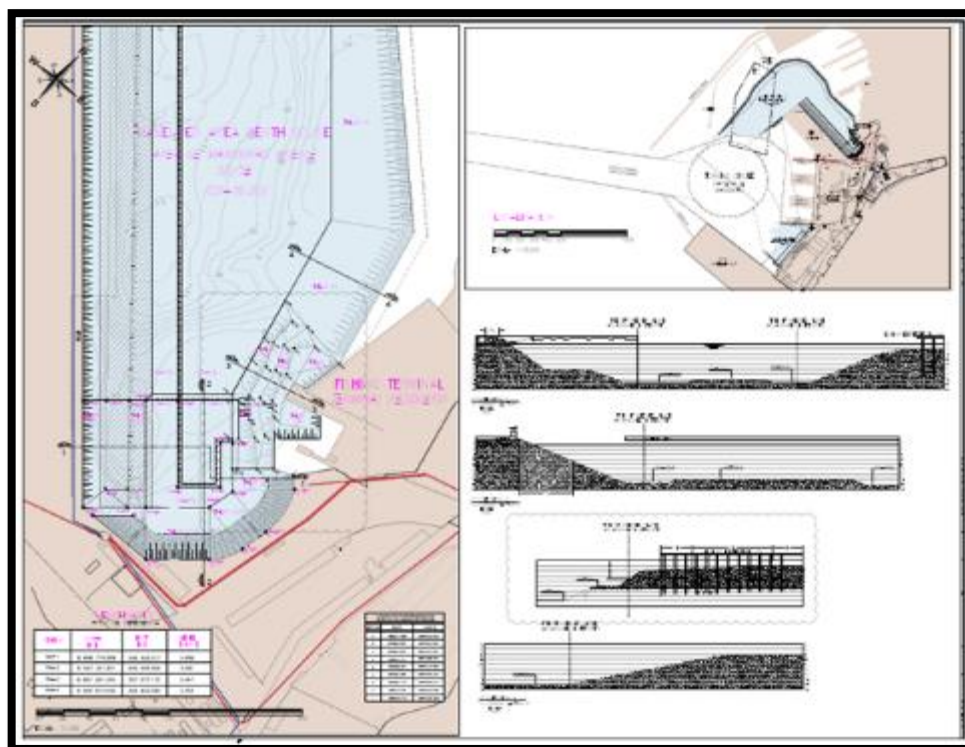
Planta del puerto del Callao y áreas de trabajo de la remodelación del Puerto



Fuente: Gobierno Regional del Callao.

Figura 16

Planta y sección de talud a evaluar, mejorar y estabilizar



Fuente: Gobierno regional del Callao.

IV. RESULTADOS

4.1. Consideraciones previas

El Documento 9W7795-CRT-TENDER3VOL4P1-1141-SPE (Expediente técnico – Modernización del terminal multipropósitos norte del Callao), detalla lo siguiente:

El suelo existente detrás de la futura pendiente dragada al final del amarradero 5E necesita ser mejorada para evitar la licuefacción de la capa de arena existente. Las capas de arena limosa encontradas con densidad que va de suelto a promedio son susceptibles a licuefacción, lo que afectaría la estabilidad de la pendiente.

Las arenas limosas serán mejoradas con el método de vibro-sustitución (compactación por columnas de piedra), que se llevarán a cabo en las áreas indicadas en los planos y de acuerdo con esta especificación. El mejoramiento de terreno se llevará a cabo en una franja ancha de 20m paralela a la pendiente final del muelle 5.

Todas las capas granulares con densidad suelta a mediana encontradas por encima de la grava de Lima o por encima de la parte superior de las capas densas superpuestas a la formación de grava de Lima deben ser mejorados. Los suelos para tratar podrían comprender arena, arena casajosa, arena limosa y grava arenosa.

- **Requisitos funcionales de columnas de piedra**

Los siguientes requisitos funcionales se establecen para la mejora de las columnas de piedra:

i) El factor de Seguridad contra licuefacción FSL de suelos potencialmente licuables entre las columnas de piedra será igual o superior a 1.1 para un Nivel 2 de terremoto. según (Seed et al., 1975) estas pruebas son corroboradas por el especialista en su laboratorio.

El requisito de factor de seguridad descrito anteriormente se ha cumplido cuando el valor $(N_1)_{60}$ de las pruebas SPT llevadas a cabo en el suelo entre las columnas de piedra es igual o mayor a 30.

Según (Youd & Idriss, 2001) Alternativamente, el factor de Seguridad contra licuefacción puede ser evaluado sobre la base de los registros del SPT o CPT siguiendo a los procedimientos descritos en "Resistencia de Licuefacción de Suelos: Reporte de Resumen de la NCEER 1996 y Talleres 1998 NCEER / NSF de Evaluación de la Resistencia de Licuefacción de Suelos, Revista de geotécnica e ingeniería geo-ambientalismo octubre 2001."

Todo tendrá que ser puesto a aprobación del Ingeniero o de su representante.

Los Suelos a ser mejorados se compactan de manera que FS_L del suelo después del tratamiento es igual o mayor a 1.1.

Se debe considerar los siguientes parámetros de entrada:

- $a_{max} = 0.52 g$.

a_{max} : Aceleración máxima horizontal del terreno de diseño (incluyendo la amplificación del suelo)

$MSF = 0.72$ (MSF : Factor de momento de escalamiento).

ii) El ángulo de fricción equivalente (en volumen) del suelo y las columnas de piedra deben ser iguales o mayores a 20 grados durante un terremoto de Nivel 2.

Este criterio se ha cumplido cuando el ratio de mejoramiento de área de columna de piedra A_c/A es igual o mayor a $1/3$, donde:

- A es la superficie total, y
- A_c es el área de la piedra.

Alternativamente, un ratio de mejoramiento de área más baja que $1/3$ se puede aceptar cuando el contratista puede demostrar que el ángulo de fricción equivalente (en volumen) calculado durante un terremoto de nivel 2 será de por lo menos 20 grados.

La siguiente fórmula, por tanto, se utilizará para calcular el ángulo ϕ' equiv de fricción equivalente (en volumen):

$$\sigma'_{v0} \tan(\phi'_{\text{equiv}}) = \sigma'_{v0} (1-r_{u,s}) \tan(\phi'_s(1-A_c/A)) + \sigma'_{v0} (1-r_{u,c}) \tan(\phi'_c(A_c/A))$$

Donde:

- σ'_{v0} : la tensión inicial efectiva vertical (en condiciones no sísmicas)
- ϕ'_s : el ángulo de fricción efectivo del suelo (en condiciones no sísmicas)
- ϕ'_c : el ángulo de fricción efectivo de columna de piedra (en condiciones no sísmicas)
- A_c/A : el ratio de mejoramiento de área de columna de piedra
- r_u : el ratio residual de poro en exceso residual. $r_u = u/\sigma'_{v0}$, donde u es la presión de

la exploración. La cantidad de presión de poro acumulado está relacionada con el factor de seguridad contra licuefacción. La tabla que se muestra más abajo se puede utilizar para determinar la relación r_u del exceso residual de presión de poro.

- $r_{u,s}$: relación residual del exceso de presión de poros en el suelo
- $r_{u,c}$: relación residual del exceso de presión de poros en la columna de piedra.

Tabla 1

FoS (Factor de seguridad) contra licuefacción vs. exceso residual de ratio de presión de poro

Factor de seguridad (FoS) contra licuefacción)	Ratio de Exceso Residual de Presión de Poro
SFL	r_u
1.1	0.50
1.2	0.30
1.3	0.20
1.4	0.15
1.5	0.10
1.6	0.05
1.7	0.03
1.8	0.02

1.9	0.01
2.0	0.00

Fuente: "Resistencia de Licuefacción de Suelos: Reporte de Resumen de la NCEER 1996 y Talleres 1998 NCEER / NSF de Evaluación de la Resistencia de Licuefacción de Suelos, Revista de geotécnica e ingeniería geo-ambientalismo/octubre 2001."

Los siguientes criterios de evaluación y de aceptación deben realizarse:

- Pruebas in situ: Para cada 400m² de terreno mejorado con un pozo con Pruebas de Penetración Estándar (SPT) en intervalos de 1 m, o 1 Prueba de Penetración de Cono (CPT) registrado electrónicamente, se llevarán a cabo.
- Todas las correcciones necesarias se aplican a los valores registrados de acuerdo con "Resistencia de Licuefacción de Suelos: Reporte de Resumen de la NCEER 1996 y Talleres 1998 NCEER / NSF de Evaluación de la Resistencia de Licuefacción de Suelos, Revista de geotécnica e ingeniería geo-ambientalismo/octubre 2001."
- Pruebas de laboratorio: por cada 400 m² de terreno mejorado, se determinará la distribución del tamaño de partículas potencialmente licuables de la capa mediante pruebas PSD en por lo menos 2 muestras a diferentes profundidades.
- Otras pruebas que puedan ser necesarias, tomando como base los resultados de la evaluación de licuefacción.

Las siguientes condiciones se aplicarán a las pruebas de rendimiento:

- La evaluación de performance in situ se realizará en el suelo entre las columnas de piedra: en el centro de la malla triangular formada por columnas de piedra.
- Los lugares de las pruebas performance in situ se acordarán con el Ingeniero.

- Todas las pruebas, in-situ y de laboratorio, se realizarán de acuerdo con la norma ASTM correspondiente.

- El número y tipo de prueba y su ubicación y profundidad deberán ser registrados.

Las copias firmadas de estos registros y los resultados de las pruebas se presentarán al Ingeniero, o su representante, al término de cada prueba individual.

Requisitos Generales:

1. Construcción de columnas de piedra, completos en el lugar incluyendo diseño.
2. Equipamiento de piedra triturada (o grava) tal y como se requiere para las columnas de piedra.
3. Equipamiento mobiliario, energía eléctrica, agua y cualquier otro elemento necesario para la instalación de la columna de piedra.
4. Construcción de una plataforma de trabajo estable y del acceso necesario al sitio.
5. Control y eliminación de las aguas superficiales procedentes de operaciones de construcción de columna de piedra.
6. Control, almacenamiento y eliminación de material excedente (incluyendo material natural que esté disponible), de ser necesario.
7. Monitoreo de suelo mejorado, tal y como se especifica.

Materiales:

La piedra triturada (grava) para el relleno de la columna debe estar limpia, ser dura, ser piedra protegida de la intemperie, libre de materia orgánica, basura u otros materiales perjudiciales, químicamente inerte para permanecer estable durante la construcción de la columna y la vida laboral en la condición anticipada de las aguas subterráneas.

Cuando se someta a la prueba de la solidez de sulfato de magnesio (ASTM C88), el porcentaje de pérdida de peso no debe ser mayor a 15%.

Cuando se pruebe de acuerdo con la norma ASTM C131, la piedra triturada (grava) tendrá una pérdida máxima del 45% a 5000 revoluciones.

El material deberá ser compatible con la vibro planta utilizada y fluir libremente dentro y desde abajo y a través de sistemas de suministro de alimentación de entrada sin arquearse, que puedan bloquear estos sistemas.

El contratista deberá presentar los resultados de las pruebas de laboratorio (las que deberán incluir, pero no limitarse a la clasificación y gravedad específica) obtenidos por él o su subcontratista, acerca de la piedra de cada fuente.

Una nueva serie de pruebas pueden ser realizadas por cada 2000 toneladas, o según lo requiera el Ingeniero o su representante.

La clasificación de material utilizado para formar columnas de piedra será adecuada para la compactación para formar una columna densa con enclavamiento total al suelo circundante. La clasificación también dependerá del método y de la planta utilizada para formar las columnas.

Las siguientes especificaciones se adoptarán:

- Alimentación superior seca – material nominal de tamaño individual dentro de la gama de 40 mm a 75 mm o un material clasificado dentro de estos límites es apropiado con un máximo de contenido de desechos (material de sedimentación y partículas de tamaño de arcilla) de 5% permisible.
- Alimentación inferior seca - material nominal de tamaño individual dentro de la gama de 20 mm a 50 mm es adecuado normalmente y el contenido de desechos no deberá ser superior a 5%.
- Alimentación superior húmeda - material nominal de tamaño individual dentro de la gama de 20 mm a 50 mm, con no más de 5% de desechos.

4.2. Estudios de mecánica de suelos y sondeos

El área de estudio comprende el final del amarradero 5E cerca de la zona de pescadores.

Según el expediente técnico de la obra se observa que la zona de estudio comprende una capa de arena susceptible a licuado para condiciones sísmicas que requiere de alguna forma de mejora de suelo.

También por condiciones del proyecto dan como responsable del diseño de las columnas grava al contratista o diseñar algún otro método de mejoramiento de suelo que sea aprobado por el ingeniero supervisor.

Como trabajos iniciales, tomaron cinco sondeos nuevos “**SGR5-01, SGR5-03, SGR5-04, SGR5-05 Y SGR5-06.**

Las coordenadas de ubicación, cotas y profundidades alcanzadas de los puntos explorados se muestran en el cuadro siguiente:

Tabla 2

Coordenadas - cotas y profundidades

Coordenadas - cotas y profundidades				
Sondaje aje	Coordenadas UTM (WGS-84)		Cota del punto de perforación (msnm)	Profundidad de perforación(m)
	Norte	Este		
SGR5-01	8667310.617	266868.023	2.720	16.050
SGR5-03	8667342.100	266880.022	2.746	15.450
SGR5-04	8667355.389	266904.803	2.789	15.350
SGR5-05	8667371.231	266920.565	2.818	17.450
SGR5-06	8667419.539	266928.715	2.785	16.220

Fuente: Gobierno Regional del Callao.

Perfiles estratigráficos

A continuación, se describe cada uno de los perfiles estratigráficos, cabe recordar que los perfiles se prepararon tomando en cuenta la información de campo:

Sondaje SGR5-01: Se encontró 2.00 m. de material de relleno, compuesto por grava arenosa mal graduada, sub redondeada de $TM=2.5''$ en estado húmedo de color gris. El nivel freático de halo a 1.19 m.

De 2.00 m. a 7.00 m: Se halló un limo inorgánico de baja plasticidad muy blanda, húmeda y de color gris.

De 7.00 m. a 10.50 m: Se halló arena fina mal graduada, ligeramente limosa en estado suelto a medianamente denso, húmeda y de color gris.

De 10.50 m a 11.80 m: Se halló una grava arenosa mal graduada, sub redondeada con $TM=2.5''$ en estado húmedo de color gris con presencia de finos.

De 11.80 m. a 12.50 m: Se halló un limo inorgánico de baja plasticidad, muy blanda, húmeda y de color gris.

De 12.50 m. a 16.05 m: Se halló una grava arenosa mal graduada, sub redondeada con $TM=2.5''$ en estado húmedo de color gris con presencia de finos, restos de finos limosos de plasticidad media a baja de color marrón claro y presencia de boloneria aislada.

Sondaje SGR5-03: Se encontró una losa de concreto de 0.15 m. de espesor, luego hasta los 6.00 m. material de relleno compuesto por grava mal graduada con presencia de boloneria sub redondeadas y fragmentadas de roca sub angulosas aislados de $TM=7''$, en estado húmedo, de color gris, con presencia de concreto y trozos de madera en los 2 primeros metros. El nivel freático se halló a 1.60 m.

De 6.00 m. a 10.50 m: Se halló una arena fina mal graduada ligeramente limosa en estado suelto a medianamente denso, húmeda y de color gris, con presencia de restos de madera.

De 10.50 m. a 11.50 m: Se halló grava mal graduada compuesta por fragmentos de roca sub redondeada a redondeados de $TM=2.5''$ con presencia de conchuelas.

De 11.50 m. a 15.45 m: Se halló grava mal graduada compuesta por fragmento de rocas sub redondeados a redondeados de $TM=4''$.

Sondaje SGR5-04: Se encontró hasta los 5.00 m. material de relleno, compuesto por grava mal graduada con presencia de boloneria sub redondeadas fragmentados de roca sub angulosas aislados de $TM=2''$ en estado húmedo, de color gris, con presencia de restos de hidrocarburos desde los 1.30 m. y restos de madera a los 4.00 m. El nivel freático se halló a 1.20 m.

De 5.00 m. a 10.50 m: Se halló una arena fina mal graduada ligeramente limosa en estado medianamente denso a denso, húmeda y de color gris, con presencia de restos de conchuelas.

De 10.50 m. a 15.35 m: Se halló grava mal graduada, densa, sub redondeada con $TM=2.5''$ en estado húmedo y de color gris.

Sondaje SGR5-05: Se encontró una losa de concreto de 0.15 m. de espesor luego hasta los 2.40 m. material de rellano compuesto por grava arenosa, ligeramente arcillosa, mal graduada con presencia de boloneria sub redondeada con $TM=2.5''$, en estado húmedo, de color gris. Un estrato inferior de arena fina ligeramente arcillosa, mal graduada, densa en estado húmedo de color marrón oscuro y presencia de material orgánico. El nivel freático se halló a 1.50 m.

De 2.40 m. a 3.80 m: Se halló un relleno de concreto con $TM=4.5''$ con presencia de restos metálicos.

De 3.80 m. a 4.50 m: Se halló un limo inorgánico de baja plasticidad, muy blanda, húmeda y de color gris.

De 4.50 m. a 9.50 m: Se halló una grava arenosa mal graduada, sub redondeada con TM=2.5" en estado húmedo de color gris con presencia de finos.

De 9.50 m. a 12.85 m: Se halló una grava arenosa mal graduada, sub redondeada con TM=3" en estado húmedo de color gris con presencia de madera y jebes.

De 12.85 m. a 14.15 m: Se halló una arena fina limosa mal graduada en estado denso, húmeda y de color marrón, con presencia aislada de gravas de TM=1".

De 14.10 m. a 15.50 m: Se halló una grava arenosa mal graduada, sub redondeada con TM=4" en estado húmedo de color gris.

De 15.50 m. a 16.50 m: Se halló una grava arcillosa mal graduada, sub redondeada con TM=2" en estado húmedo de color marrón.

De 16.50 m. a 17.45 m: Se halló una grava arenosa mal graduada, sub redondeada con TM=2.5" en estado húmedo de color gris.

Sondaje SGR5-06: Hasta los 6.50 m. se encontró material de relleno compuesto por grava arenosa, con fragmento de roca sub redondeados y presencia de restos de concreto desde los 2.80 m. y entes de arena desde los 4.00 m. a 4.50 m. por debajo de los 4.50 m. se halla una grava arenosa mal graduada con fragmentos de rocas de TM=2.5". El nivel freático se halló a 1.35m.

De 6.50 m. a 12.50 m: Se halló una arena fina limosa mal graduada, medianamente denso a denso, húmeda y de color oscuro, con presencia de restos de conchuelas y gravas aisladas.

De 12.50 m. a 15.10 m: Se halló una grava arenosa mal graduada, sub redondeada con TM=2.5" en estado húmedo gris.

De 15.10 m. a 16.22 m: Se halló una grava arenosa mal graduada, sub redondeada con TM=3" en estado humeado de color gris.

a) Terratest Memoria de cálculo para estabilización de suelos - Informe de Pilotes

(2013): se realizó el análisis de potencial de licuación con los sondajes L-107 y SGR5-01 al SG-06 con el sismo de diseño de $M = 8.5$ y $a_{max} = 0.52g$.

En el que concluye que existirá licuación de suelos hasta 11 m, llegando en el sondaje L-107 en otros sondajes a los 13 y 14 metros. En la superficie encuentran rellenos con grava en algunos sondajes.

Para el mejoramiento de suelos contra la licuación, Pilotes Terratest (2013) presenta el sistema de columnas de grava.

Según (Seed H.B y Booker J.R., 1977) El diseño se basa en el método de Seed y Booker (1977) que considera el drenaje de las gravas. La permeabilidad de la grava debe ser por lo menos 200 veces mayor que la permeabilidad de la arena susceptible a la licuación.

El efecto de una mayor densificación del suelo arenoso y el aumento de rigidez del suelo mejorado no se tiene en cuenta en esta metodología. Para la determinación de las características del sismo de diseño se han utilizado sismos chilenos.

En la presente tesis se incorporan datos de sismos peruanos y se presentan rangos de dimensiones y espaciamientos de las columnas de gravas, así como valores distintos de números de ciclos para la licuación inicial, que influyen los cálculos de diseño de las mallas.

También se presentan los cálculos para el ángulo de fricción efectivo equivalente del suelo mejorado ante la acción sísmica.

La estabilización de estratos de arena potencialmente licuables usando columnas de grava

Para mitigar los daños producidos por efecto de licuación de suelos, se busca prevenir al 100% el desarrollo de exceso de presión de poro que ocurre al producirse un evento sísmico.

Se debe de optar por alguna solución cuando el factor de seguridad contra la licuación en arenas es menor a 1.0.

El principal objetivo de las columnas de grava (con permeabilidad significativamente mayor que la arena licuable), es la rápida disipación del exceso de presión de poro por la reducción de la trayectoria de drenaje entre columnas de grava, manteniendo el desarrollo del exceso de presión de poro por debajo del 100% durante el evento sísmico.

Incluso, si el incremento presión de poro llega al 100%, éste es rápidamente disipada por las columnas de grava, sin generar deformaciones excesivas en el terreno.

4.3. Análisis de licuación

El análisis de licuación de suelos se realizó en base a los sondeos proporcionados para dicho estudio, también en base a los parámetros sismo de diseño solicitados para la estabilización del suelo. El análisis de Licuación se realizó con el software de ingeniería LIQUEFY Versión 4.5D de CIVIL TECH.

Los parámetros sismo de diseño se encuentran en el Informe Técnico: “Memoria de Cálculo de Mejoramiento de Suelos Columnas de Grava” solicitando un sismo de $M_w = 8.5$ y una aceleración máxima de diseño de 0.52g. Además, las Especificaciones Técnicas indica que para el análisis de licuación deberá utilizarse una aceleración máxima de 0.52 g incluyendo la amplificación sísmica en la superficie. Este sismo corresponde a un período de retorno de 475 años (L2).

En el estudio de Amplificación Sísmica Terminal Norte Multipropósito Callao, se utilizaron dos perfiles estratigráficos para el Muelle. Para un periodo de retorno de 475 años la aceleración máxima en roca fue de 0.43 g. Las aceleraciones máximas en la superficie de los perfiles 1 y 2 fueron de 0.37 g y 0.51 g. respectivamente.

Se ha realizado el análisis del potencial de licuación de suelos para los perfiles L-107, SGR5-01 a SGR5-6 tanto para aceleración máxima de 0.37g y 0.51 g, considerando una magnitud sísmica de $M_w = 8.2$

En todos los casos ocurre el fenómeno de licuación de suelos en la arena que existe por encima de la grava. En algunos sondeos se aprecia relleno por encima de la arena licuable que habría que atravesar con el equipo apropiado. La profundidad de la mejora sería hasta los 12 m. en promedio. Esto queda respaldado según Alva (1994) donde nos habla sobre la licuefacción en el Perú, y donde esto ocurre con más frecuencia en toda nuestra costa peruana. Esto es causado principalmente por la placa de nazca.

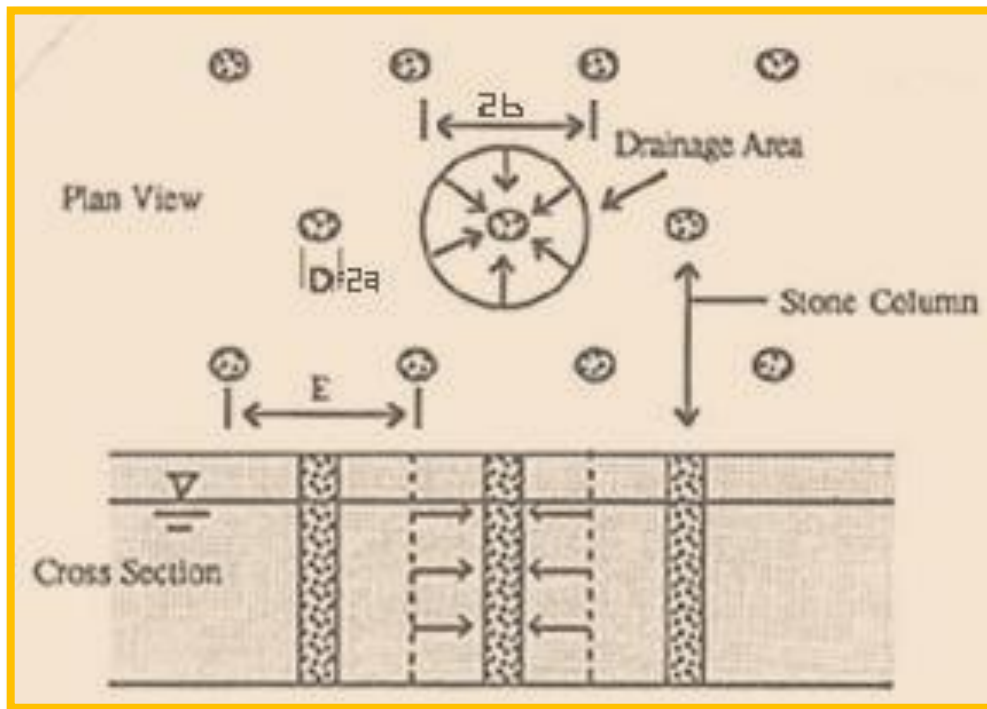
4.4. Diseño de Columnas de Grava – Seed & Booker (1977)

El diseño de columnas de grava asume que una columna recolecta agua de un volumen cilíndrico, de radio igual a “b” (que se puede apreciar en la figura que se muestra a continuación), definiendo el radio de la columna “a”, el espaciamiento para evitar licuación es determinado por el análisis de infiltración, definido por la ecuación:

$$\frac{k_h}{\gamma_w m_v} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{k_v}{\gamma_w m_v} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t}$$

En la cual, k_h y k_v son las permeabilidades tanto en las direcciones radial y vertical, respectivamente, γ_w es el peso unitario del agua, m_v es el coeficiente de compresibilidad volumétrica constante, u es el exceso de presión de poro, u_g es el exceso de presión de poro generado por el sismo.

Cuando el suelo es no drenado, entonces $u = u_g$. Dicha ecuación ignora la resistencia de la grava contra el flujo de agua.

Figura 17*Geometría de la columna de grava*

Fuente: Seed & Booker (1977).

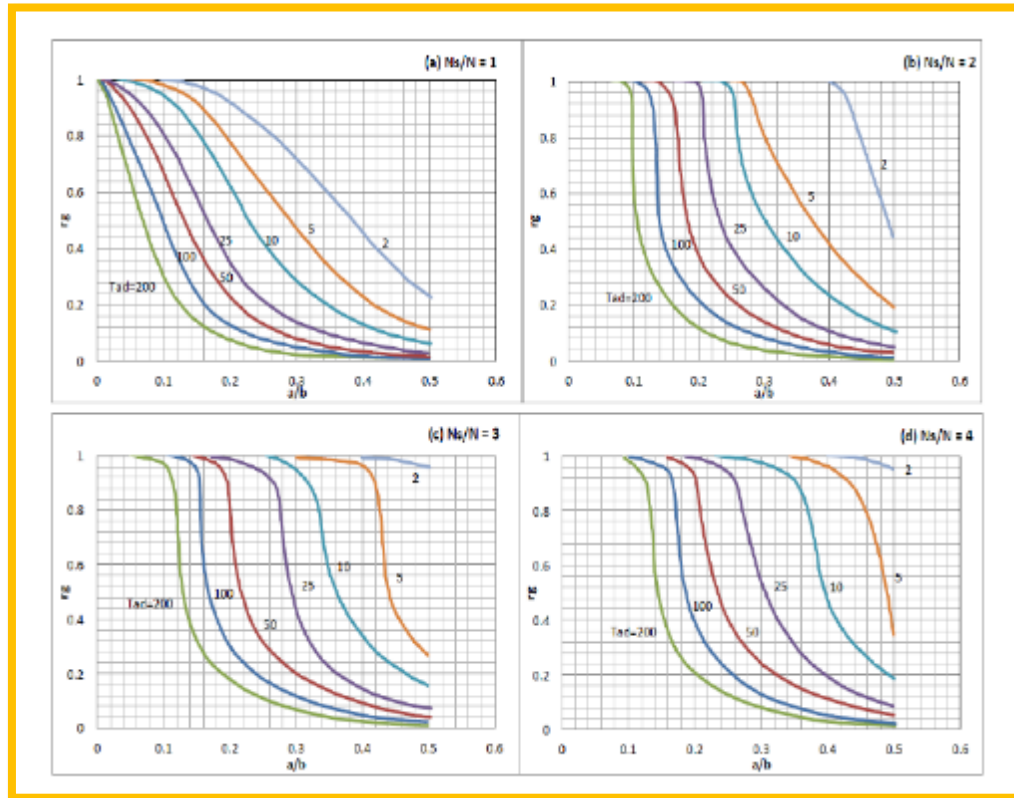
Consideramos, entonces, una red de columnas de grava, de diámetro $2a$ y espaciamiento efectivo $2b$, instalados en la capa de arena de permeabilidad horizontal k , el método asume una permeabilidad isotrópica ($k_h = k_v = k$), un esfuerzo efectivo inicial σ'_o así la arena tiene la cualidad de licuarse después de N ciclos de esfuerzo uniforme.

Supóngase también que el estrato de arena es sujeto a un evento sísmico que consiste en N_{eq} ciclos de esfuerzo uniforme en tiempo t_d .

Bajo el supuesto de un drenaje puramente radial, la relación de presión de poro $rg = u/\sigma'_o$ a lo largo de la arena, el sistema de drenaje (columna de grava), depende de los siguientes parámetros adimensionales: a/b = relación geométrica de los drenes; N_{eq}/N_I = relación que caracteriza la “gravedad” del evento sísmico en relación al comportamiento licuable de la arena; el factor de tiempo $T_{ad} = (k \cdot t_d)/(m_v \cdot w \cdot a^2)$.

Figura 18

Diagrama de diseño de columna de grava



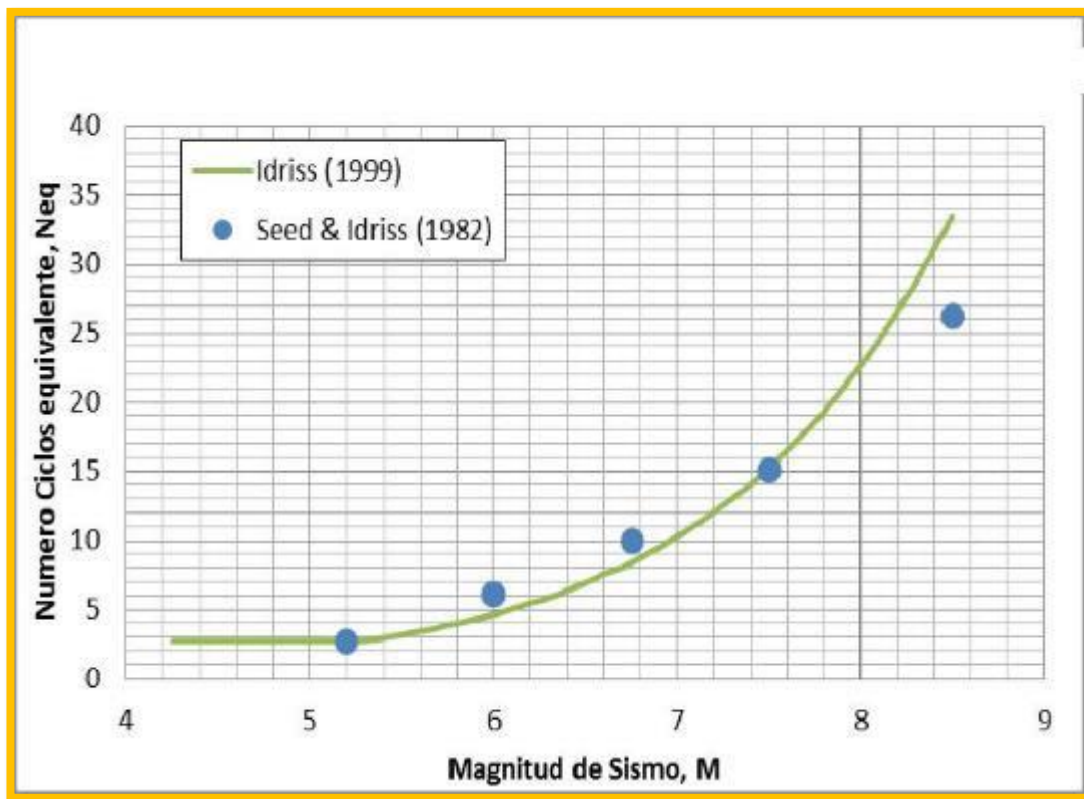
Fuente: Seed & Booker 1977).

La figura anterior nos ayuda para el cálculo de “b”, en el diagrama se asume que el esfuerzo de corte cíclico es repetido “Neq” ciclos con una amplitud constante de τ_{cy} (igual a $0.65 \tau_{max}$), y la arena puede licuarse cuando τ_{cy} es repetida “N” ciclos.

Para determinar el Neq, hacemos uso de la relación propuesta por Seed e Idriss (1982) e Idriss (1999), que se muestran a continuación:

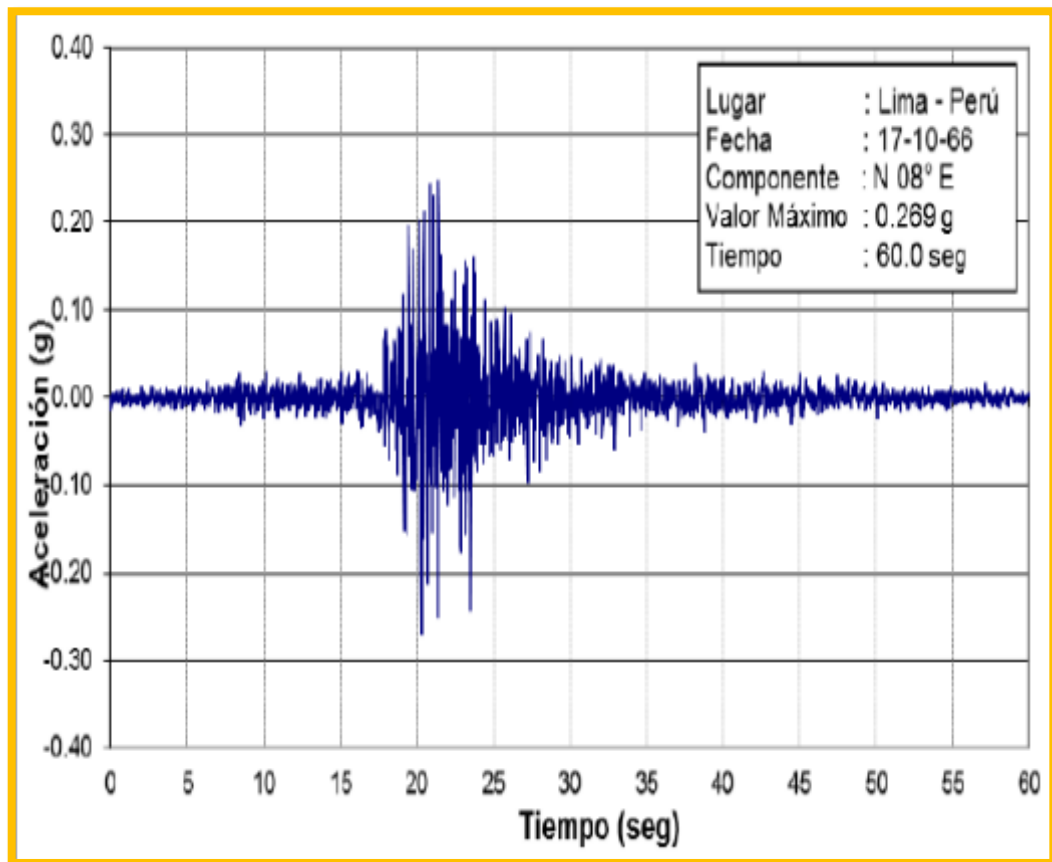
Figura 19

Número de ciclos equivalentes Vs magnitud de sismo



Fuente: Seed & Idriss (1982) e Idriss (1999).

El tiempo de duración del evento sísmico (t_a), lo asumimos considerando los registros obtenidos en la ciudad de Lima, por ejemplo, el sismo registrado el 17-10-66, con una duración de 40 segundos más 50%, será de 60 segundos.

Figura 20*Espectro de aceleración*

Fuente: Sismo Lima 1966

El coeficiente de compresibilidad volumétrica m_v , lo calculamos a partir del Módulo de Elasticidad (E_s) y la Relación de Poisson, que a su vez es obtenido del $N(SPT)$, con las siguientes correlaciones.

Figura 21

Correlaciones para E_s y m_v , en función de $N(\text{SPT})$.

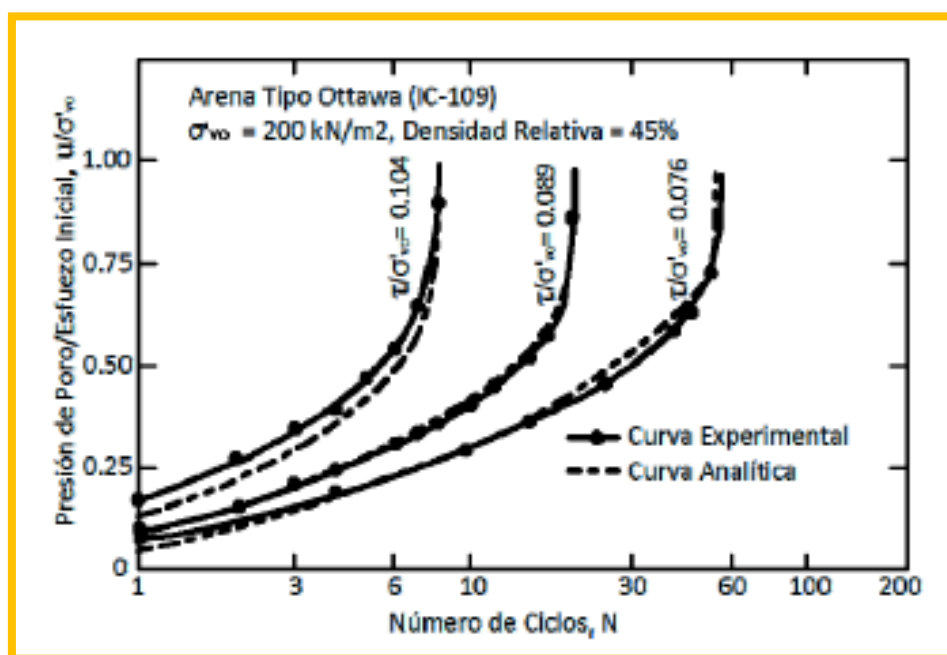
Soil	SPT	CPT
Sand (normally consolidated)	$E_s = 500(N + 15)$ $= 7000 \sqrt{N}$ $= 6000N$ — — — $\ddagger E_s = (15\,000 \text{ to } 22\,000) \cdot \ln N$	$E_s = (2 \text{ to } 4)q_u$ $= 8000 \sqrt{q_c}$ — — — $E_s = 1.2(3D_r^2 + 2)q_c$ $*E_s = (1 + D_r^2)q_c$
Sand (saturated)	$E_s = 250(N + 15)$	$E_s = Fq_c$ $e = 1.0 \quad F = 3.5$ $e = 0.6 \quad F = 7.0$
Sands, all (norm. consol.)	$\S E_s = (2600 \text{ to } 2900)N$	
Sand (overconsolidated)	$\dagger E_s = 40\,000 + 1050N$ $E_{s(\text{OCR})} \approx E_{s,nc} \sqrt{\text{OCR}}$	$E_s = (6 \text{ to } 30)q_c$
Gravelly sand	$E_s = 1200(N + 6)$ $= 600(N + 6) \quad N \leq 15$ $= 600(N + 6) + 2000 \quad N > 15$	
Clayey sand	$E_s = 320(N + 15)$	$E_s = (3 \text{ to } 6)q_c$
Silts, sandy silt, or clayey silt	$E_s = 300(N + 6)$	$E_s = (1 \text{ to } 2)q_c$
	If $q_c < 2500 \text{ kPa}$ use $\S E'_s = 2.5q_c$ $2500 < q_c < 5000$ use $E'_s = 4q_c + 5000$ where $E'_s = \text{constrained modulus} = \frac{E_s(1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} = \frac{1}{m_v}$	
Soft clay or clayey silt		$E_s = (3 \text{ to } 8)q_c$

Fuente: Bowles (1988).

La relación de presión de poro $rg = u/\sigma'_o$, se define como la razón entre el incremento de la presión de poros y la presión efectiva vertical inicial. Lo cual indica el nivel de aumento de la presión de poros la arena. Para decidir el nivel de presión de poros se utiliza el estudio de Finn (1981) que relaciona el número de ciclos con la variación de presión de poros.

Figura 22

Incremento de la presión de poros/presión efectiva - inicial vs. número de ciclos



Fuente: Finn (1981)

Tabla 3

Parámetros usados para el diseño de columnas de grava

Número de golpes promedio del ensayo SPT en el estrato licuable.	N	12
Magnitud momento del Sismo.	M _w	8.2
Número de ciclos de carga equivalente durante un terremoto. (1)	N _{eq}	27
Relación de Poisson	u	0.3
Peso Específico del agua.	w (kN/m ³)	9.8
Módulo de Elasticidad. (2)	E (Mpa)	10800
Permeabilidad horizontal del estrato potencialmente licuable.	k _h (m/s)	1.00E-05
Coefficiente de Compresibilidad Volumétrica. (3)	m _v (m ² /KN)	6.88E-05
Relación del Incremento de Presión de Poro. (4)	r _g	0.4

Tiempo de duración del sismo de diseño.	td (seg)	60
---	----------	----

Para el valor de N(spt), se utilizaron los resultados de los sondeos SQR5-01, SQR5-03, SQR5-04, SQR5-05, SG-06 Y L-107, realizados por “MR & ASOCIADOS S.A.C (2013 y 2012)”, escogidos por su ubicación y por contar con datos en toda la estratigrafía de cada sonduje. Se realizaron análisis considerando diferentes relaciones de N_{eq}/N_I , y con un diámetro 2a de 0.80 m. y 0.50 m. A continuación, se presenta el cuadro comparativo de resultados.

Estabilización de depósitos de arena potencialmente licuables usando drenes de grava. (Seed & Booker, 1977).

Tabla 4

Cuadro comparativo de resultados

M	--	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2
Neq	26	27	27	27	27	27	27	27	27
N _I	9	27	13	9	7	27	13	9	7
Neq/N _I	3	1	2	3	4	1	2	3	4
kh (m/s)	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05
mv (m ² /KN)	5.00E-05	6.88E-05	6.88E-05	6.88E-05	6.88E-05	6.88E-05	6.88E-05	6.88E-05	6.88E-05
rg	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
td (seg)	75	60	60	60	60	60	60	60	60
Tad	9.57	5.56	5.56	5.56	5.56	14.24	14.24	14.24	14.24

Fuente: “Memoria de Cálculo de Mejoramiento de Suelos – Columnas de Grava”. PILOTES TERRATEST.

El informe de Pilotes Terratest (2013) solamente indica un valor de N_{eq}/N_l , mientras que la presente tesis se preparó una hoja de cálculo para incluir diferentes valores de N_{eq}/N_l y los diámetros distintos de las columnas de grava. También se modificaron valores de m_v , t_d , y t_{ad} para aproximar mejor el comportamiento de los sismos peruanos.

Se concluye que para un diámetro de 0.80 m de la columna de grava el espaciamiento entre ejes debería ser de 1.55 m y para las columnas de grava de 0.50 m de diámetro el espaciamiento debería ser de 1.20 entre ejes.

Ángulo de fricción efectivo equivalente del suelo mejorado

El ángulo de fricción equivalente entre el suelo (arena licuable) y el material gravoso de la columna, debe ser igual o mayor a los 20° , durante un evento sísmico de nivel 2, de acuerdo a las Especificaciones Técnicas.

Este criterio se cumple cuando la relación A_c/A es igual o mayor a 0.33, donde:

- A_c es el área de la columna de grava.
- A es el área total.

Sin embargo, para valores de A_c/A menores a 0.33 (siendo el caso en estudio), se debe demostrar analíticamente que el ángulo de fricción equivalente durante un evento sísmico es mayor o igual que los 20° , mediante el uso de la siguiente fórmula:

$$\sigma'_{v0} \tan(\phi'_{equiv}) = \sigma'_{v0} (1-r_{u,s}) \tan(\phi'_s(1-A_c/A)) + \sigma'_{v0} (1-r_{u,c}) \tan(\phi'_c(A_c/A))$$

Donde:

r_g : Relación del incremento de presión de poro.

a : Radio del dren de grava.

b : Radio del área drenante.

ϕ'_s : Ángulo de fricción de la arena licuable.

ϕ'_c : Ángulo de fricción de la grava en la columna.

ϕ'_{eq} : Ángulo de fricción equivalente.

$r_{u,s}$: Relación del incremento de presión de poro en la arena.

$r_{u,c}$: Relación del incremento de presión de poro en la columna.

Además: $r_g = r_{u,s} = r_{u,c}$.

Tabla 5

Ángulo de fricción equivalente calculado por PILOTES TERRATEST.

Obteniéndose en cada caso:

r_g	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
a (m)	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.25	0.25	0.25	0.25
b (m)	1.03	1.26	1.01	0.89	0.82	1.05	0.81	0.69	0.64
A_c (m ²)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.20	0.20	0.20	0.20
A (m ²)	3.33	4.99	3.17	2.51	2.12	3.48	2.05	1.51	1.30
A_c/A	0.15	0.10	0.16	0.20	0.24	0.06	0.10	0.13	0.15
$\phi's$ (°)	30	30	30	30	30	30	30	30	30
$\phi'c$ (°)	40	40	40	40	40	40	40	40	40
$\phi'eq$ (°)	20.3*	19.9	20.4	20.7	21.0	19.6	19.9	20.1	20.3

Fuente: Informe técnico “Memoria de Cálculo de Mejoramiento de Suelos - Columnas de Grava”.

PILOTES TERRATEST.

De la tabla anterior para los dos casos propuestos se cumple con la condición del ángulo mayor que 20. grados.

Precio estimado referencial de columnas de grava por 1 ml como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6

Análisis costos unitario directo de columnas de grava

	Rendimiento	120 ml/d	jornada	8 h/d		
COSTO UNITARIO DE COLUMNAS DE GRAVA						
	INSUMOS	UNIDAD	CUADRILLA	CANTID.	P.U.	COSTO TOTAL
1.0	MAQUINARIA Y EQUIPOS					
1.1	Maquina Vibro compactadora	HM	1	0.067	460	30.667
1.2	Máquina Perforadora de pilotes	HM	1	0.067	460	30.667
1.3	Retroexcavadora	HM	1	0.067	250	16.667
1.4	Camión Tolva	HM	1	0.067	170	11.333
1.5	Prueba de campo	GBL		1.000	200	200.00
2.0	MATERIALES					
2.1	Gravilla, 8-38mm, D=0.80m, 5% DESP.	ML		0.528	65	34.32
3.0	MANO DE OBRA					
3.1	Operario	HH	3	0.200	23.49	4.698
3.2	Peon	HH	1	0.067	16.79	1.119
TOTAL					SOLES (S/.)	329.47

Del cuadro de análisis unitarios, el costo total en ml para su ejecución de esta partida estará dado por:

$$12\text{ml} \times 1\,179\text{ud} \times 329.47 = 4\,661\,341.56 \text{ S/.} / 1\,236\,430.12 \$$$

Figura 23

Instalación de columnas de grava, en el amarradero N°5



Fuente: PILOTES TERRATEST

4.5. Resultados descriptivos

Describe los resultados de datos existente y observados. La situación a que lleven a ver nuevos hechos.

Tabla.7

Comparación del grado de estabilización

Descripción	Sin mejoramiento		Con mejoramiento		Diferencia %
	Cantidad	Und	Cantidad	Und	
Capacidad Portante	0.6	Kg/cm2	1.08	Kg/cm2	44.45
Factor de seguridad(Fs)	0.20	-	1.26	-	84.13
SPT	8	(N) Golpes	30	(N) Golpes	73
Asentamiento	8.56	cm	3.50	cm	70.95

De la tabla 7 presenta los resultados:

- En cuanto al grado de resolución del problemas; el suelo sin mejorar tiene una capacidad portante de 0.60kg/cm^2 , cuando se aplica el método de columnas de grava, por el esfuerzo que toma las columnas. Esto genera un aumento del 1.08kg/cm^2 de la capacidad portante del terreno. Esto genera un incremento del 44.45%.
- El terreno analizado inicialmente es potencialmente licuable debido que el factor de seguridad que es 0.20, con la aplicación del método de columnas de grava este aumento en un 1.26. lo cual nos significa un incremento del 84.13%. y para que el terreno no sea potencialmente licuable el factor de seguridad tiene que ser igual o superior a 1.1.
- Al inicio del estudio del suelo a mejorar, se observó que el SPT con 8 números de golpes llega a un estrato consistente. después de la aplicación método de columnas el SPT aumento el número de golpes en 30, lo cual nos arroja una variación del 73%.
- El terreno analizado inicialmente sin mejoramiento el asentamiento es: 8.55cm. cuando se aplica el método de columnas gravas, el mejoramiento de asentamiento diferencial es: 3.50cm. por lo tanto esto tendrá una variación del 40.95%.

Prueba de hipótesis

Hipótesis general

H0: No existe un efecto significativo, empleando columnas de grava en la estabilización de talud en suelo susceptible a licuado

H1: Existe efecto significativo, empleando columnas de grava en la estabilización de talud en suelo susceptible a licuado.

En función de los resultados de la tabla 7, la aplicación ha generado cambios y según Monsalve (2018), Falla (2021), Poves (2017) y Carvajal (2020) en muchos de ellos nuestros resultados semejantes. Por lo tanto, rechazamos la H0, para quedarnos con la H1, porque, además cuenta con un incremento 68.13% de mejoramiento de terreno.

Hipótesis específicas:

- Existe efecto significativo de la aplicación empleando columnas de grava para mejorar la capacidad portante del terreno en suelos blandos. En función de los resultados de la tabla 7, la aplicación a generado cambios y según Monsalve (2018), Falla (2021), Poves (2017) y Carvajal (2020), en muchos de ellos nuestros resultados que se asemejan. Por lo tanto, rechazamos la H0, para quedarnos con la H1. porque, además cuenta con un incremento 44.45%. el cual, al mejorar la capacidad portante, esta área intervenida puede soportar la estructura proyectada.
- Existe efecto significativo de la aplicación empleando columnas de grava para mitigar la licuefacción en suelos blandos. En función de los resultados de la tabla 7, la aplicación a generado cambios y según Monsalve (2018), Falla (2021), Poves (2017) y Carvajal (2020), en muchos de ellos nuestros resultados se asemejan. Por lo tanto, rechazamos la H0, para quedarnos con la H1, porque, además cuenta con un incremento 84.13% de mejoramiento de terreno. En la cual el factor de seguridad tiene que ser igual o superior a 1.1.
- Existe efecto significativo de la aplicación empleando columnas de grava para disminuir del asentamiento diferencial en suelos blandos. En función de los resultados de la tabla 7, la aplicación a generado cambios y según Monsalve (2018), Falla (2021), Poves (2017) y Carvajal (2020), en muchos de ellos nuestros resultados se asemejan. Por lo tanto, rechazamos la H0, para quedarnos con la H1. porque, además cuenta con una disminución del 70.95%. el cual, al disminuye el asentamiento diferencial, en esta área intervenida así la estructura no corre el riesgo de futuros colapsos.

V. DISCUSION DE RESULTADOS

- En función al objetivo principal: Analizar el efecto del empleando columnas de grava en la estabilización de talud en suelo susceptible a licuado. Se demostró que:
 1. Presentan resultados. En función de los resultados de la tabla 7, esta técnica ha generado un incremento del 68.13% de mejoramiento de terreno y estabilización. Todo esto es gracias al diseño de columnas de grava.
 2. Comparativa de tus resultados con otros resultados, de los antecedentes nacionales de la tesis de Falla (2021), podemos observar que para poder llegar al objetivo de la estabilización de talud toma los siguientes puntos como; el cual se aplicó cinco sondas en el terreno mediante ensayos de penetración estándar(SPT) así poder obtener los datos de necesarios del terreno y en el cual nos arroja que esta área es susceptible a licuado. Que coincide con la aplicación el diseño mediante el método de SEED&BOOKER, el cual nos brinda el diámetro de las columnas y el espaciamiento entre ellas, en este caso los datos no son iguales, pero sí muy parecido hay que tener en cuenta que el diámetro y el espaciamiento depende entre si, según formula. Por lo tanto, aplicando este modelo podemos ver las mejoras en la estabilización de taludes.
 3. Se busca una teoría que respalde o explique tus resultados. En la elaboración de esta tesis en las cuales se realizó trabajos en campo como el ensayo de penetración estándar, los trabajos realizados en gabinete. y en la aplicación del diseño mediante el método de SEED&BOOKER nos brinda el diámetro de las columnas y el espaciamiento entre ellas. Según Falla (2021) en esta tesis es aplicada en el puerto del callao, muelle 5E, en la cual puede validar los datos tomados en campo pruebas (SPT) y la elaboración en gabinete como en la aplicación el diseño mediante el método de SEED&BOOKER, en la cual se obtendrá la sección de las columnas de grava. Por lo tanto, nos resultado un

mejoramiento del terreno, mitiga la licuefacción, mejora la capacidad portante del terreno, disminuye la diferencia de asentamiento y se observa que al mejorar el terreno disminuye el número de golpes (SPT).

- Analizar el funcionamiento de la técnica empleando columnas de grava para mejorar la capacidad portante del terreno en suelos blandos.

1 Presentan resultados. En función de los resultados de la tabla N°7, después de la aplicación de columnas de grava, se puede observar que hubo un incremento del 44.45%. gracias a la aplicación de columnas de grava, el cual se puede observar que una de las características es el aumento de la capacidad portante del terreno, así podrá soportar el peso de la estructura sin ningún problema de colapso.

2 Comparativa de tus resultados con otros resultados, de los antecedentes nacionales de la tesis de Salazar (2017). Como plantea esta tesis donde nos habla que todo el litoral peruano en este caso en particular nuestra zona costera el suelo es débil para poder soportar estructuras grandes. Ellos también aplican el método de columnas de grava, aunque ellos aplican otro método de diseño para poder encontrar las secciones y espaciamientos de las columnas, y gracias a esto aumenta la capacidad portante del terreno.

3 Se busca una teoría que respalde o explique tus resultados. En la elaboración de esta tesis según Salazar (2017). se realizó los trabajos en campo y gabinete en la cual se aplicó el diseño de columnas de grava, el cual fue aplicado, es validos decir los resultados se puede aplicar el litoral peruano. Podemos decir que por los resultados expuestos si aportan, a esta tesis presentada. Porque si hay mejora de terrenos y en una de sus características es el de aumentar la capacidad portante del terreno.

- Analizar el funcionamiento de la técnica empleando columnas de grava para mitigar la licuefacción en suelos blandos. Se demostró que:

1 Presentan resultados. En función de la tabla 7, después de la aplicación de columnas de grava, se puede observar que hubo un incremento del 84.13%, en este caso consiste en que obtener el nuevo factor de seguridad el cual tiene que ser mayor a 1.1. así podremos decir que el área intervenida disminuye la licuefacción. Y en la cual se procede a construir el proyecto diseñado.

2 Comparativa de tus resultados con otros resultados, de los antecedentes internacionales de la tesis de Carvajal (2020). Aunque este mejoramiento con columnas de gravas fue realizado en costa rica, pero en una zona costera, en la cual también se llegó aplicar el método de columnas de grava, también el mismo diseño de SEED&BOOKER, ayuda a mejorar el factor de seguridad y por ende esto afecta a que disminuya la licuefacción. Por lo tanto, aplicando este método podemos decir. Que mitiga la licuefacción en suelos blandos.

3 Se busca una teoría que respalde o explique tus resultados. En la elaboración de esta tesis según Carvajal (2020). se realizó los trabajos y diseño de columnas de grava, el cual fue aplicado, aunque esto fue realizados en el país de costa rica. Podemos decir que por los resultados expuestos respaldan, esta tesis presentada.

- Analizar el funcionamiento de la técnica empleando columnas de grava para disminuir del asentamiento diferencial en suelos blandos.

1 Presentan resultados. En función de los resultados de la tabla 7, después de la aplicación de columnas de grava, se puede observar que hubo un incremento del 70.95%. con la aplicación de columnas de grava, se observa que una de las características es disminuir del asentamiento diferencial del terreno a intervenir, así no

habrá una diferencia de nivel de la estructura, así no tendrá problemas de fisuras, colapso y volteo.

2 Comparativa de tus resultados con otros resultados, de los antecedentes nacionales de la tesis de Torres (2017). podemos observar que para poder llegar al objetivo de la disminuir el asentamiento diferencial se toma los siguientes puntos como; el cual se aplicó los sondajes en el terreno mediante ensayos de penetración estándar(SPT) ya después de aplicar el método de columnas. así poder obtener los nuevos datos del terreno intervenido. Que coincide en la aplicación el diseño mediante el método de SEED&BOOKER(1976), el cual nos brinda la sección de las columnas y el espaciamiento entre ellas, en este los datos no son iguales, pero sí muy parecidos. Por lo tanto, aplicando de este método de columnas de grava, también nos ayuda a disminuir el asentamiento diferencial en suelos

3 Se busca una teoría que respalde o explique tus resultados. En la elaboración de esta tesis según Torres (2017). se realizó los trabajos en campo y gabinete en la cual se aplicó que el diseño de columnas de grava, el cual fue aplicado, en el puerto del callao-muelle 5E. Podemos decir que por los resultados expuestos si aportan y respaldan, a esta tesis presentada. Porque si hay mejoras en el terreno y una de sus características es el de disminuir el asentamiento diferencial del terreno.

VI. CONCLUSIONES

6.1. Se determinó el efecto del empleando columnas de grava en la estabilización de talud en suelo susceptible a licuado, que mejoró el terreno en los siguientes puntos: Capacidad Portante, Factor de seguridad (Fs), SPT y Asentamiento, en algunos casos tuvo un incremento y disminución como ya se comentó en la tabla 7. El cual mejor el terreno en un 68.13%. por lo tanto, el método de estabilización de depósitos de arena potencialmente licuables, es el de la instalación de columnas de grava, la cual disipa la presión de poros generada por una carga cíclica casi tan rápido como ésta se genera. El método desarrollado por Seed & Booker en 1977, es usado para el diseño de las columnas de grava.

6.2. Se comprobó el funcionamiento de la técnica empleando columnas de grava para mejorar la capacidad portante del terreno en suelos blandos, se obtuvo los datos suelo sin mejorar tiene una capacidad portante de 0.60kg/cm^2 , cuando se aplica el método de columnas de grava, por el esfuerzo que toma las columnas. Esto genera un aumento del 1.08kg/cm^2 de la capacidad portante del terreno. Esto genera un incremento del 44.45%, así podrá soportar el peso de la estructura sin ningún problema de colapso.

6.3. Se determinó el funcionamiento de la técnica empleando columnas de grava para mitigar la licuefacción en suelos blandos. El terreno analizado inicialmente es potencialmente licuable debido que el factor de seguridad que es 0.20, con la aplicación del método de columnas de grava este aumento en un 1.26. lo cual significa un incremento del 84.13%. y para que el terreno no sea potencialmente licuable el factor de seguridad tiene que ser igual o superior a 1.1. En todos los casos analizados (perfiles L-107, SGR5-01 AL SGR-06) ocurre el fenómeno de licuación en las arenas encontradas, hasta una profundidad promedio de 12 m. En

consecuencia, es necesario realizar el mejoramiento de la cimentación para evitar la licuación de suelos con el sismo de diseño.

6.4. Se determinó el funcionamiento de la técnica en el empleando columnas de grava para disminuir del asentamiento diferencial en suelos blandos. El terreno analizado inicialmente sin mejoramiento el asentamiento es: 8.55cm. cuando se aplica el método de columnas gravas, el mejoramiento de asentamiento es: 3.50cm. por lo tanto esto tendrá una variación del 40.95%. así no habrá una diferencia de nivel de la estructura, así no tendrá problemas de fisuras, colapso y volteo.

6.5. Se observa da la figura: 24, donde se plantea las columnas de grava de diámetro de 0.50 y 0.80 en un área en común de 18.63m² y se observa:

D1 = 0.80m tiene 5 Ud. de columnas de grava

D2 = 0.50m tiene 10 Ud. de columnas de grava

Por lo tanto, se tomó la decisión de optar con el diámetro de 0.80m porque ahí solo entran 5 columnas de grava. Esto a su vez nos indica un ahorro significativo en tiempo y materiales para la ejecución del proyecto.

Figura 24

Columnas de grava de diámetro de 0.50 y 0.80

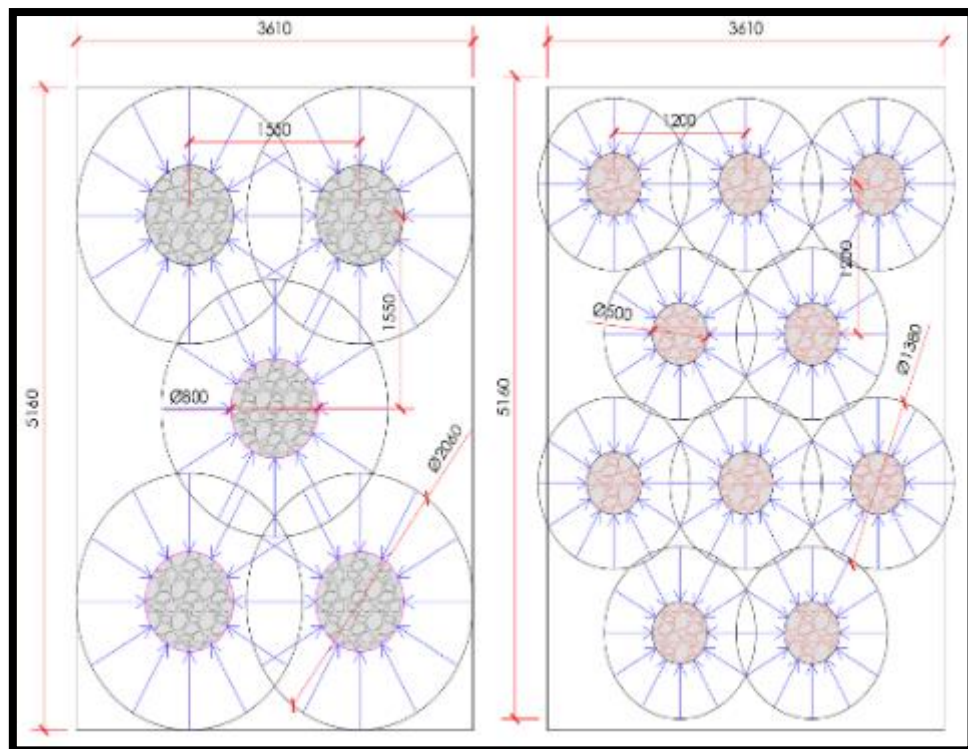
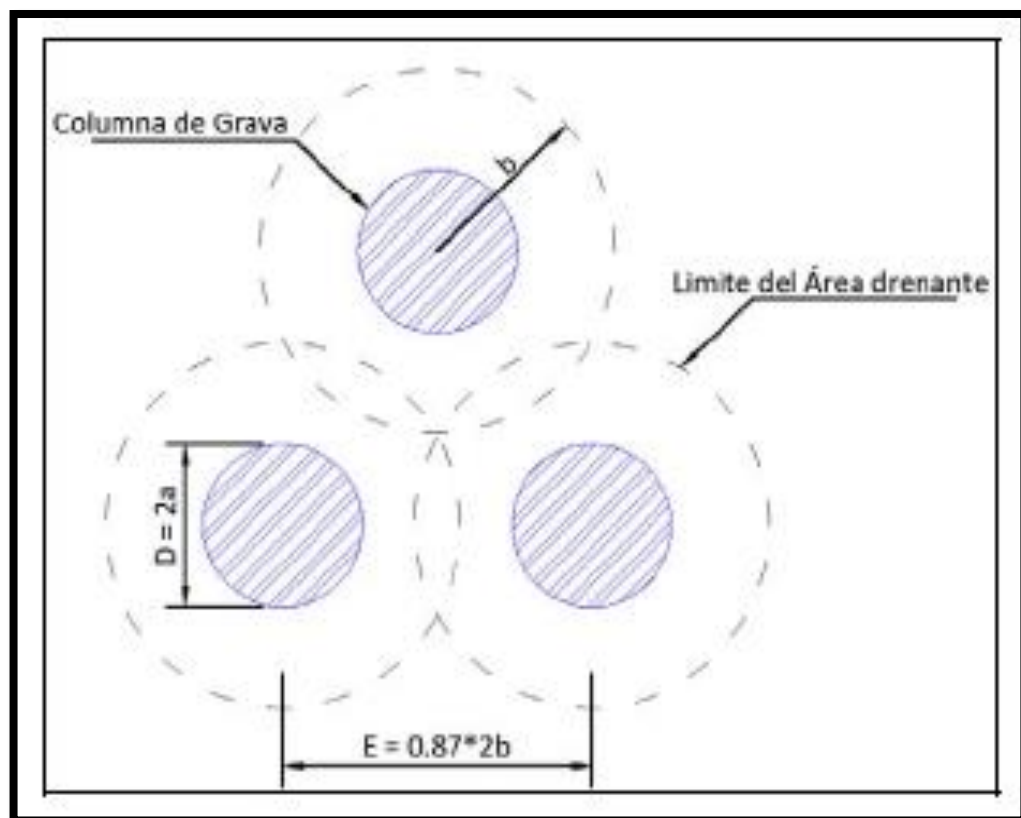


Figura 25

Distribución geométrica de la malla, indicando el área de influencia de cada columna de grava.



6.6. Se debe indicar que el espaciamiento calculado es menor que el indicado en el estudio de Pilotes Terratest para el diámetro de 0.80 m.

6.7. El análisis realizado tan solo contempla la disipación de la presión de poros con la acción sísmica. No se toma en cuenta el incremento de la densidad de arena con la fabricación de la columna de grava ni el incremento en la rigidez del sistema con la introducción de la grava.

VII. RECOMENDACIONES

7.1. Esta técnica se recomienda aplicar en suelos susceptibles a licuado y en base a los estudios la alternativa de las columnas de grava propuestas por Pilotes Terratest y que también es recomendada por Pilotes Franki y Geopier. Mejora la estabilidad de los taludes.

7.2. Se recomienda a las instituciones pertinentes como el ministerio de vivienda, construcción y saneamiento introducir en la normativa de mecánica de suelos, la aplicación del método de columnas de gravas. Como una opción mas de mejoramiento de suelos así se podrá difundir aún más el método de columnas de gravas.

7.3. Se recomienda la siguiente especificación para la grava: La grava sugerida es en el rango de 8 mm. a 38 mm. Chancada (Para obtener un alto grado de fricción interna) y con un porcentaje de perdida en ensayo Los Ángeles (ASTM C131) menor a 35%.

7.4. En la realización de un buen estudio geotécnico en la cual obtendremos las características exactas, así podremos hacer un buen diseño de columnas de gravas. U otro método de mejoramiento de suelos.

7.5. De los datos del Anexo B, se obtuvo los siguientes resultados:
Se observa que el dato obtenido tiene un beneficio hacia el método de columnas de grava por vibro sustitución con respecto a excavación profunda pilotes. A continuación, veremos, los porcentajes de ahorro económicamente de un 44.04% y en el número de días 89.52%.

7.6. Este tipo de proyectos es muy beneficioso desde la parte de producción, adaptabilidad, impacto ambiental, innovación y ejecución versus excavación profunda pilotes.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso Pollán, J. A. (2014). *Diseño basado en técnicas de fiabilidad del tratamiento de mejora del terreno mediante columnas de grava* [Phd, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM)].
<https://oa.upm.es/26409/>
- Alva, J. E. A. (1994). *LICUACIÓN DE SUELOS EN EL PERÚ*.
- Arias Gonzáles, J. L. (2020). *Técnicas e instrumentos de investigación científica*. Enfoques Consulting EIRL. <http://repositorio.concytec.gob.pe/handle/20.500.12390/2238>
- Bautista, D. A., & Mayorga, E. D. (2018). *Análisis del mejoramiento de suelos empleando el método de columnas de grava*. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/5190>
- Carrillo, flores. (2015). *Población y Muestra*.
- Carvajal, Y. A. (2020). Diseño de cuatro obras geotécnicas: Diseño de la cimentación de un edificio de once niveles mediante una losa de fundación sobre un suelo arenoso, estabilización de talud de suelo utilizando el sistema de malla metálica con anclajes pasivos, estabilización de un talud de roca fracturada y el diseño geotécnico de una solución mediante la técnica cortar y cubrir para construir un túnel. *Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica*.
<https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/82702>
- Cimentada Hernández, A. I. (2009). Análisis experimental en modelo reducido de la consolidación radial y deformación de un suelo blando mejorado con columnas de grava. En *Tesis Doctorales en Red (TDR)*. Universidad de Cantabria.
<https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/1199>
- CLAUDIA ANGELICA QUIJADA ORTEGA VALDIVIA. (2008). *MEJORAMIENTO DE SUELOS EN BASE A LOS METODOS DE VIBROFLOTACION Y VIBROSUSTITUCION*. 165.
- Esteban Nieto, N. (2018). Tipos de Investigación. *Universidad Santo Domingo de Guzmán*.
<http://repositorio.usdg.edu.pe/handle/USDG/34>

- Falla, P. C. (2021). Propuesta de Mejoramiento de suelos licuables mediante el uso de columnas de grava en áreas portuarias – Puerto del Callao. *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/655860>
- Gómez, R. (2012). *Inclusiones Rígidas – Análisis Comparativo de los Métodos Analíticos y los Métodos Numéricos*. <https://doi.org/10.13140/2.1.3061.0728>
- Hernández-Sampieri, R. (2014). *Cuantitativo y cualitativo, sus similitudes y diferencias*. 23.
- Monsalve, I. S. (2018). *Evaluación técnica-económica de fundación mediante columnas de grava, puente bypass Lumaco, IX Región* [Thesis, Universidad Andrés Bello]. <https://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/7069>
- Núñez, F. S. (2017). *Control de asentamientos en terraplenes contruidos sobre suelo fino por medio de métodos de mejoramiento de suelos basados en vibro-sustitución* [Thesis, Universidad Andrés Bello]. <https://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/5023>
- Polo, N. (2013). *Estudio geológico-geotécnico para las instalaciones pesqueras de un puerto en el sur de España* (east=-4.422067299999981; north=36.7067938; name=Puerto, Málaga, España) [Info:eu-repo/semantics/bachelorThesis]. E.T.S.I. Minas (UPM). <https://oa.upm.es/19939/>
- Poves. (2017a). Influencia de las columnas de grava compactada en el asentamiento de suelos blandos, sector de Palian. *Universidad Nacional del Centro del Perú*. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/4106>
- Poves, J. P. (2017b). Influencia de las columnas de grava compactada en el asentamiento de suelos blandos, sector de Palian. *Universidad Nacional del Centro del Perú*. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/4106>
- Reyes, A. H. (2020). *Mejoramiento de suelos granulares mediante el uso de columnas de grava*. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/17367>
- Reyes Morales, A. H. (2020). *Mejoramiento de suelos granulares mediante el uso de columnas de grava*. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/17367>
- Risco, A. A. (2020). *Clasificación de las Investigaciones*. 5.

- Roció Maldonado, Y. A. (2022). *Interacción Suelo-Estructura para la Obtención de la Respuesta Sísmica de la Subestructura con Columnas de Grava del Puente en la Avenida Sánchez Cerro, Piura*.
<https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/5355>
- Salazar, R. L. (2017). *Mejoramiento de suelos arenosos mediante el uso de columnas de grava*.
<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/8129>
- Seed, H. B., Arango, I., & Chan, C. K. (1975). *Evaluation of soil liquefaction potential for level ground during earthquakes. A summary report* (NUREG-0026, 7146067; p. NUREG-0026, 7146067).
<https://doi.org/10.2172/7146067>
- Seed H.B y Booker J.R., D. J. (1977). Discussion of “Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drains”. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 104(4), 516-517.
<https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000624>
- Torres, J. E. (2017). *Estabilización de suelos arenosos con potencial de licuación utilizando columnas de grava: Aplicación a las obras de muelle norte Callao*.
- Villalobos, J. A. T. (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*. 328.
- Youd, T. L., & Idriss, I. M. (2001). Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(4), 297-313.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:4\(297\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:4(297))
- Zamora, J. P. Z. (2014). *OPTIMIZACIÓN DE TRATAMIENTOS DE SUELOS BLANDOS BAJO TERRAPLENES*.

ANEXOS

ANEXO A: MATRIZ DE CONSISTENCIA

Problema	Objetivos	Hipótesis	Operacionalización			Metodología	
General	General	General	Variable	Dimensión	Indicador	Tipo de investigación	Técnicas e Instrumentos
¿Cómo ayuda el empleando columnas de grava a la estabilización de talud en suelo susceptible a licuado?	Analizar el efecto del empleando de columnas de grava en la estabilización de talud en suelo susceptible a licuado.	Existe efecto significativo del empleando de columnas de grava en la estabilización de talud en suelo susceptible a licuado.	Independiente: Columnas de Gravas. Indicadores: geométrica (diámetro de la columna)	Vibrosustitución Rendimientos y costos	Rendimiento Al solo utilizar piedra, el vibrador y en ocasiones agua. No es contaminante el medio ambiente. A.P.U. Observar que las piedras estén libre de impurezas.	Tipo: Aplicada Esteban (2018) Nivel: alcance: Retrospectivo según Risco (2020) Diseño: no experimental según Risco (2020)	Técnicas: análisis documental, según Arias (2020) Instrumentos: Observación documental, según (Sánchez, 2018 citado en Arias, 2020)
¿Cómo ayuda el empleando columnas de grava a mejorar la capacidad	Analizar el funcionamiento de la técnica empleando de columnas de grava para mejorar la	Existe efecto significativo de la técnica empleando de columnas de grava para mejorar			-Long. Tangentes (m) - Velocidad directriz (km/h)		

portante del terreno en suelos blandos?	capacidad portante del terreno en suelos blandos.	capacidad portante en suelos blandos.	Indicadores: tiempo, capacidad portante, mitigar la licuefacción y asentamiento diferencial		- Peralte en curvas (%) - Curvas verticales (%) - Pendiente (%) - Ancho tangente (m)		
¿Cómo ayuda el empleando de columnas de grava a mitigar la licuefacción en suelos blandos?	Analizar el funcionamiento de la técnica empleando columnas de grava para mitigar la licuefacción en suelos blandos.	Existe efecto significativo de la técnica empleando columnas de grava para mitigar la licuefacción del terreno en suelos blandos.		Vibrosustitución Vía húmeda y suelos blandos	Agua a presión Vibrador. Terrenos cohesivos. (cuando contiene de fino > 12%) presencia de nivel freático.		
¿Cómo ayuda el empleando columnas de grava a disminuir el	Analizar el funcionamiento de la técnica empleando columnas de grava para	Existe efecto significativo de la técnica empleando columnas					

asentamiento diferencial en suelos blandos?	disminuir del asentamiento o diferencial en suelos blandos.	de grava para disminuir el asentamiento diferencial en suelos blandos.
---	---	--

--	--	--

ANEXO B: CIMENTACIÓN PROFUNDA CON PILOTES

Análisis de la alternativa con pilotes

En este capítulo describiremos el sistema de pilotaje, en el cual veremos, el costo de este sistema en el proyecto. El objetivo es señalar las actividades que tengan incidencia en la partida. Para esto, se procedió en la recopilación de proyectos similares y en tener contactos con en empresas involucradas en el mismo rubro.

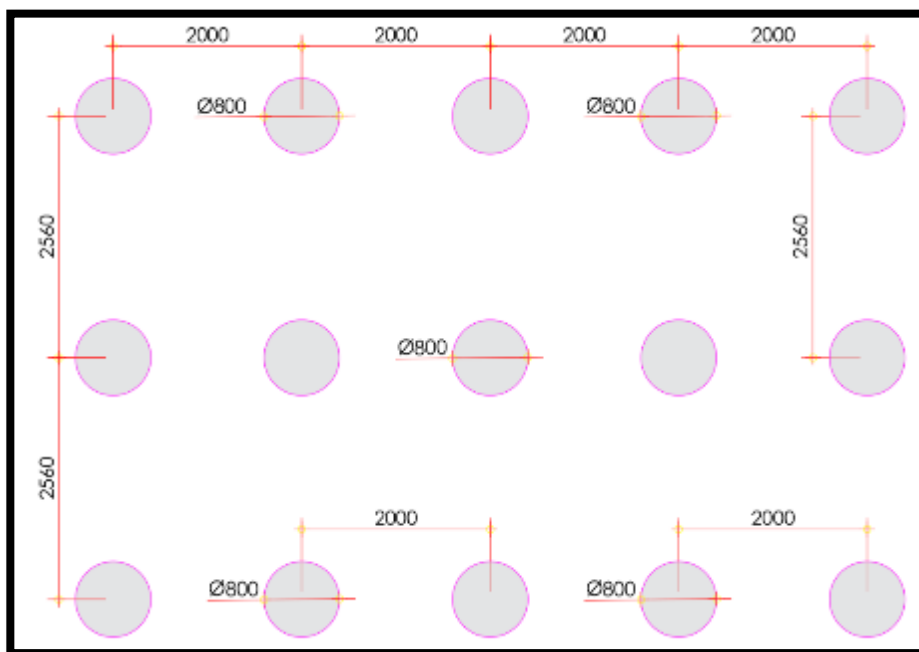
La instalación de una suma total de pilotes en el amarradero 5. Para el presente caso se determina a través del cálculo estructural proporcionado un espaciamiento transversal de 3.2 veces el diámetro y longitudinal de 2.5 veces el diámetro. El diámetro de ejecución es de 0.80 m. También de los perfiles estratigráficos se tomaron en cuenta para que los pilotes cuentan con un largo de profundidad de 25 metros.

transversal de $3.2 \cdot D = 3.2 \cdot 0.80 = 2.56\text{m}$

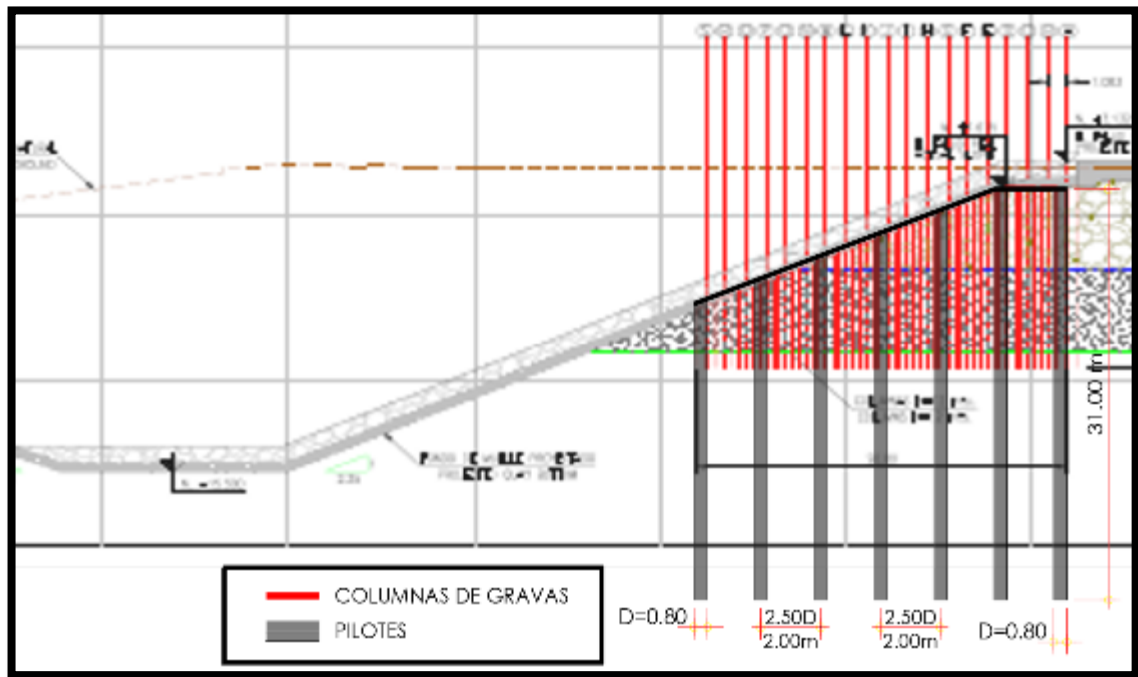
longitudinal de $2.5 \cdot D = 2.5 \cdot 0.80 = 2.00\text{m}$

Ubicación en planta de pilotes

Fuente: Elaboración propia.



Sección del proyecto alternativo mediante cimentación profunda



Los pilotes transfieren las cargas de la superestructura que atraviesan los estratos débiles o compresibles, que pasan a través del agua o aire, hasta estratos con la suficiente capacidad de carga como para soportar la estructura, el pilote se comporta como la extensión de una columna o pilar. Hasta llegar a estratos inferiores más compactos y de mejor capacidad portante o donde encontraremos rocas, arcillas duras, etc.

ANALISIS DE COSTOS UNITARIO DIRECTO DE PILOTES

Precio estimado referencial de pilotes por 1 m3 como se muestra en la siguiente tabla:

	Rendimiento	18 ml/d	jornada	8 h/d		
COSTO UNITARIO CON PILOTES						
	INSUMOS	UNIDAD	CUADRILLA	CANTID.	P.U.	COSTO
						TOTAL
1.0	MAQUINARIA Y EQUIPOS					
1.1	Máquina pilotera	HM	1	0.444	450	200.000
1.2	Soldadora	HM	1	0.444	13	5.778
1.3	Herramientas menores	GBL	1	0.444	10	4.444
2.0	MATERIALES					
2.1	Concre premezclo f'c=280 kg/cm2	M3		0.528	260	137.28
2.2	Acero f'y=4200 kg/cm2	KG		57.19	4.2	240.198
2.3	Soldadura, varios	GBL		1	13	13
3.0	MANO DE OBRA					
3.1	Operario	HH	2	0.889	23.49	20.880
3.2	Operador de pilotera	HH	1	0.444	23.49	10.440
3.3	Peones	HH	3	1.3	16.79	22.38666667
3.4						
TOTAL					SOLES (\$/.)	654.41

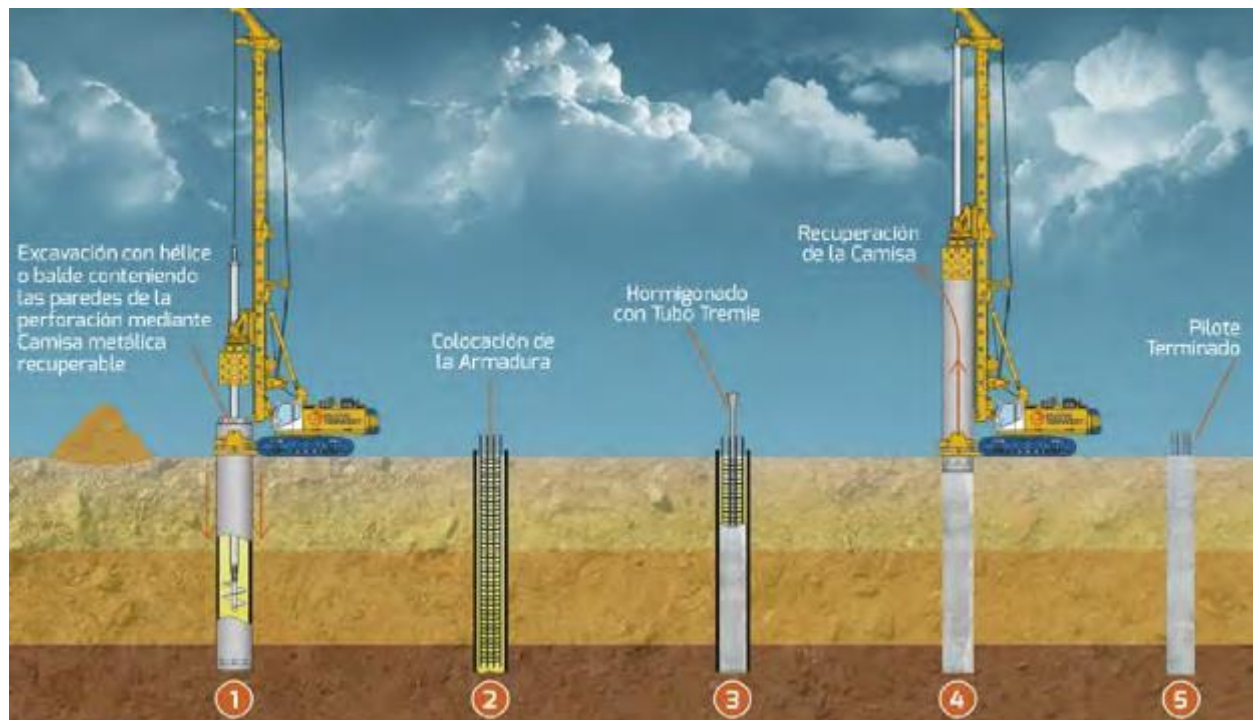
Fuente: Elaboración propia

$$Volumen = \frac{\pi d^2}{4} \times L \times cant. = \frac{\pi 0.8^2}{4} \times 25 \times 1\,013 = 12\,729.73 \text{ m}^3$$

Del cuadro de análisis unitarios, el costo total en m3 para la partida estará dado por:

$$12\,729.73 \text{ m}^3 \times 654.41 = 8\,330\,462.61 \text{ S/.} / 2\,209\,671.78 \$$$

Proceso constructivo de pilotes



Fuente: PILOTES TERRATEST.

ANEXO C: TIEMPOS DE EJECUCIÓN DE LOS DOS MÉTODOS

Consideraciones de los métodos

En este capítulo veremos los tiempos de ejecución de columnas de grava y pilotes los cuales se propuso para su ejecución en este proyecto. Tomamos en cuenta los rendimientos y cantidades del personal en obra, que fueron tomados de obras similares y con las mismas características vistos en campo.

Este análisis dará lugar al proceso de instalación de los trabajos y se extenderá hasta el trazado de la fundación de los estribos. así es posible apreciar, de manera estimada, las diferentes formas de ejecución entre ambos métodos en estudio.

cálculos de los tiempos

A continuación, estaremos desarrollando los tiempos que le tomara a las cuadrillas en realizar sus actividades de los dos métodos.

cálculos de los tiempos con pilotes

Para esta partida, se tomó un rendimiento de 18 m/día entre la excavación, colocación e instalación de malla de acero y concreto.

Datos:

Rendimiento = 18 ml/día

Nª Pilotes = 1 013 ud

Profundidad = 25 m

Longitud = 1 013 x 25 = 25 325 m

$$N^a \text{ de días} = \frac{\text{Longitud}}{\text{Rendimiento}}$$

$$N^a \text{ de días} = 25\,325 \text{ m} / 18 \text{ m/día} = 1\,406.95 \Rightarrow 1\,407 \text{ días}$$

CALCULOS DE LOS TIEMPOS CON COLUMNAS DE GRAVA

Para esta partida, se toma un rendimiento de 120 m/día. Esto incluye el posicionamiento de las máquinas, también se incluye la perforación excavación e instalación de material de grava.

Datos:

Rendimiento = 120 ml/día

Nº Columnas grava = 1 179 ud

Profundidad = 12 m

Longitud = 1 179 x 12 = 14 148 m

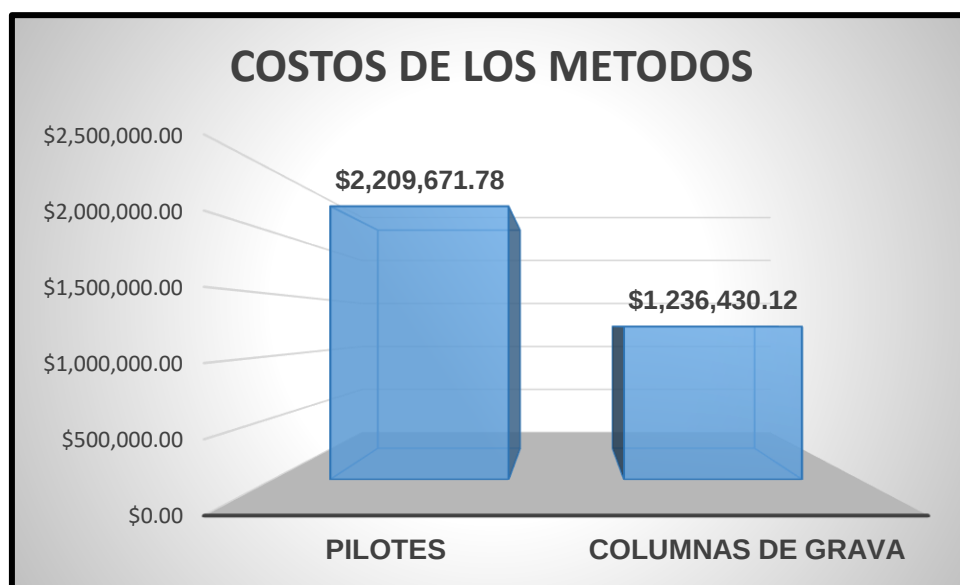
$$\text{Nº de días} = \frac{\text{Longitud}}{\text{Rendimiento}}$$

Nº de días = 14 148 m / 120 m/día = **117.9 => 118 días**

Comparativos de los costos y tiempos: con pilotes vs columnas de grava

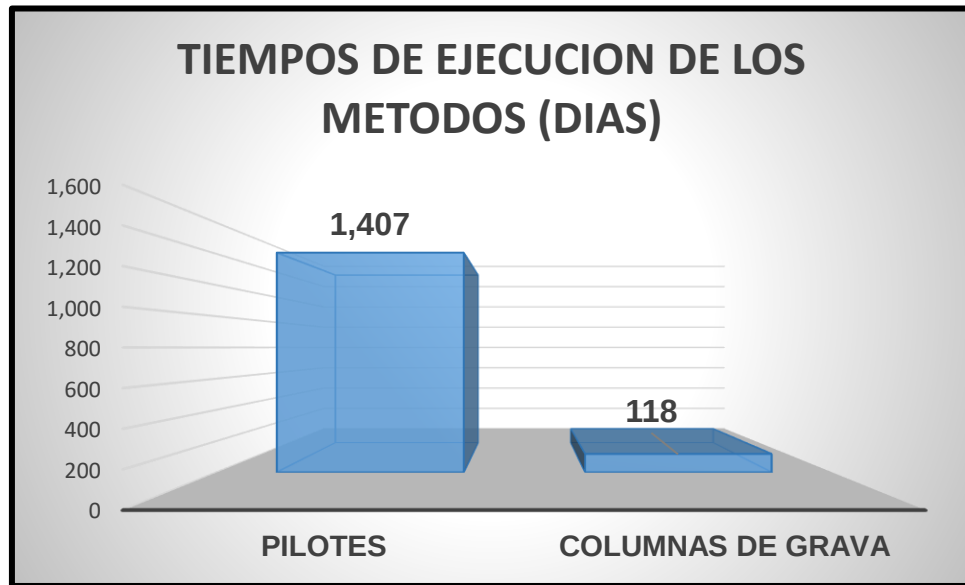
Vemos un costo menor con la implementación con columnas de grava versus al uso de pilotes.

Esta diferencia de precio con los pilotes es de **\$973 241.66** dólares americanos, como se observa en la Figura A, esta cifra es importante para el desarrollo del proyecto.



Fuente: Elaboración propia. (2022)

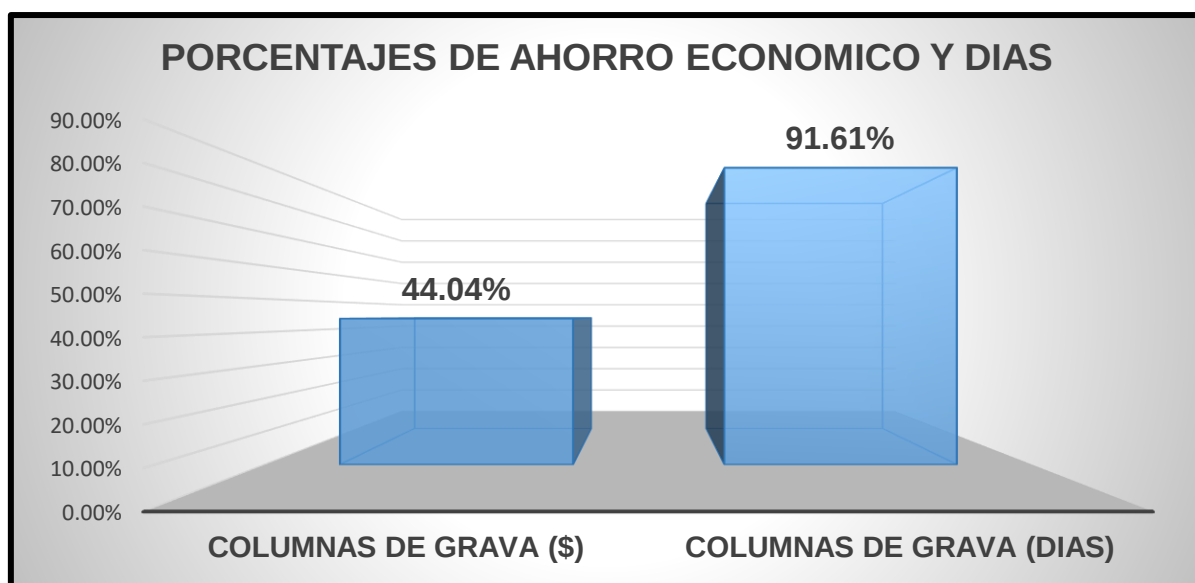
Vemos que el tiempo de ejecución es menor para la implementación con columnas de grava versus al uso de pilotes. Esta diferencia de tiempos en días con pilotes es de **1 289 días**, como se observa en la Figura B, respecto a los días se observa que se la ejecución con de columnas de grava, es considerablemente menor en los números de días.



Fuente: Elaboración propia. (2022)

Porcentaje de ahorro en el proyecto

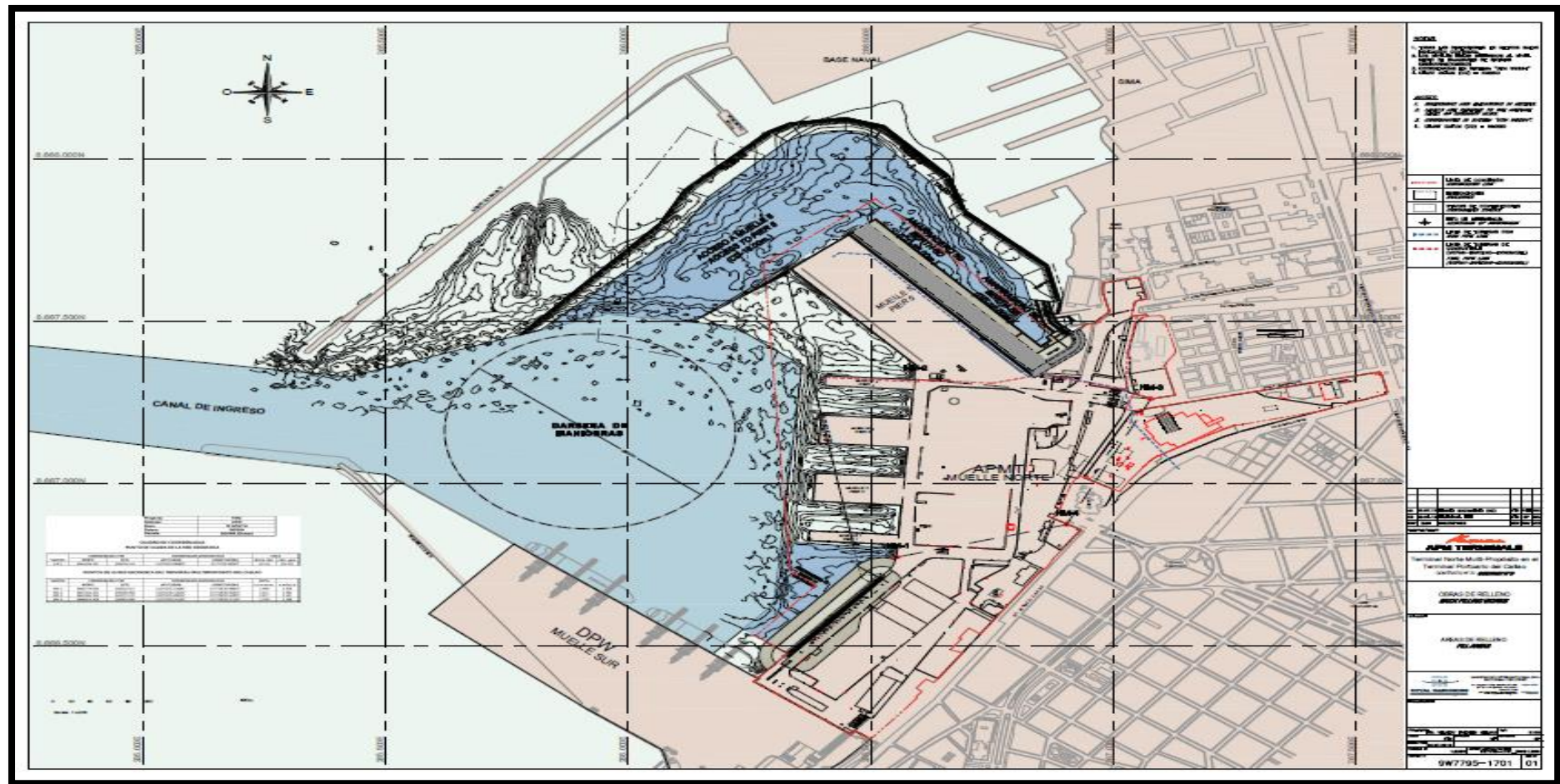
Respecto al comparativo en cuestión de este capítulo, se observa que el dato obtenido tiene un beneficio hacia el método por medio de columnas de grava por vibro sustitución. A continuación, veremos en la Figura C, los porcentajes de ahorro económicamente y en el número de días.



Fuente: Elaboración propia. (2022)

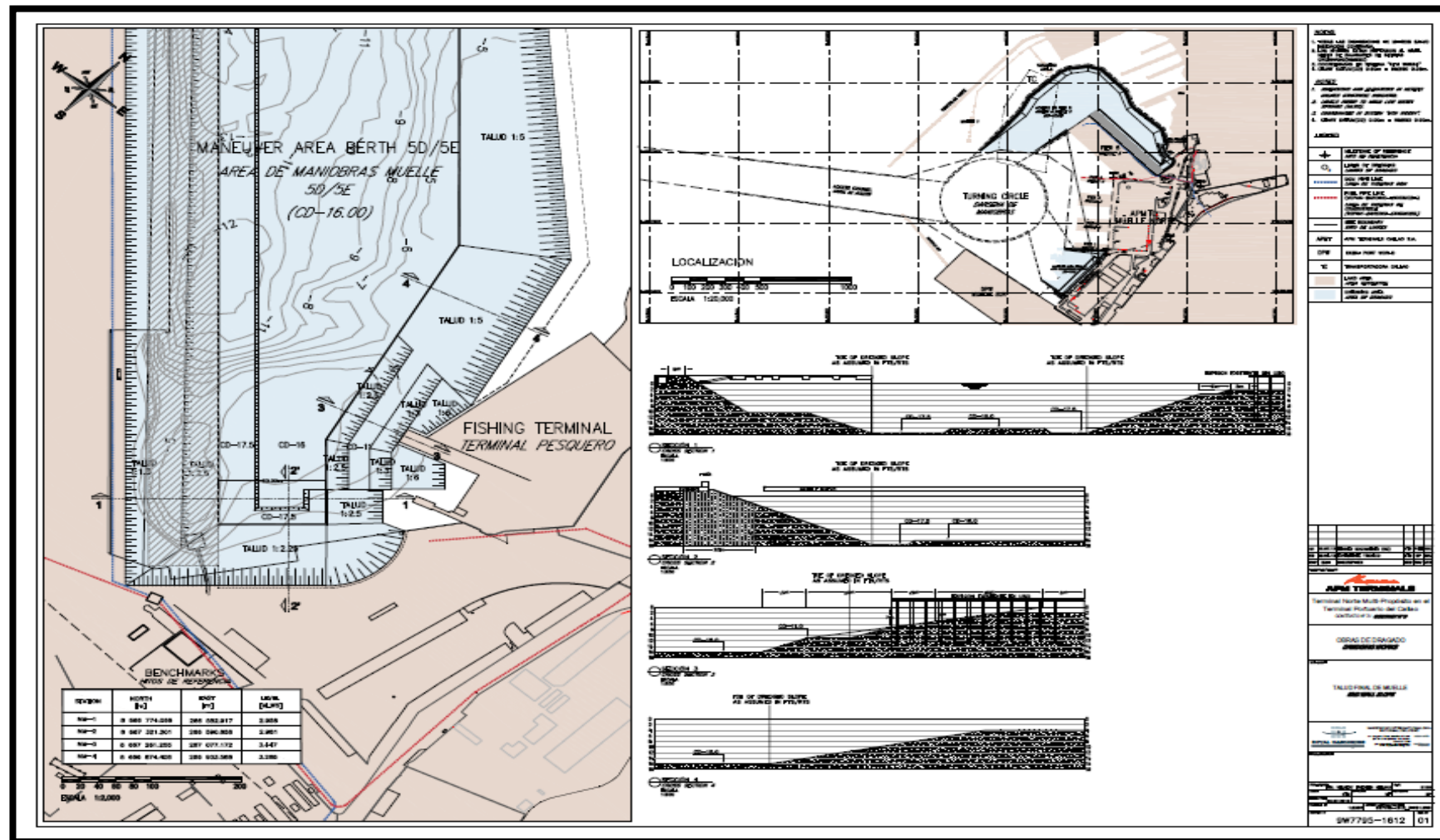
ANEXO D: PLANOS

Planos de áreas de relleno



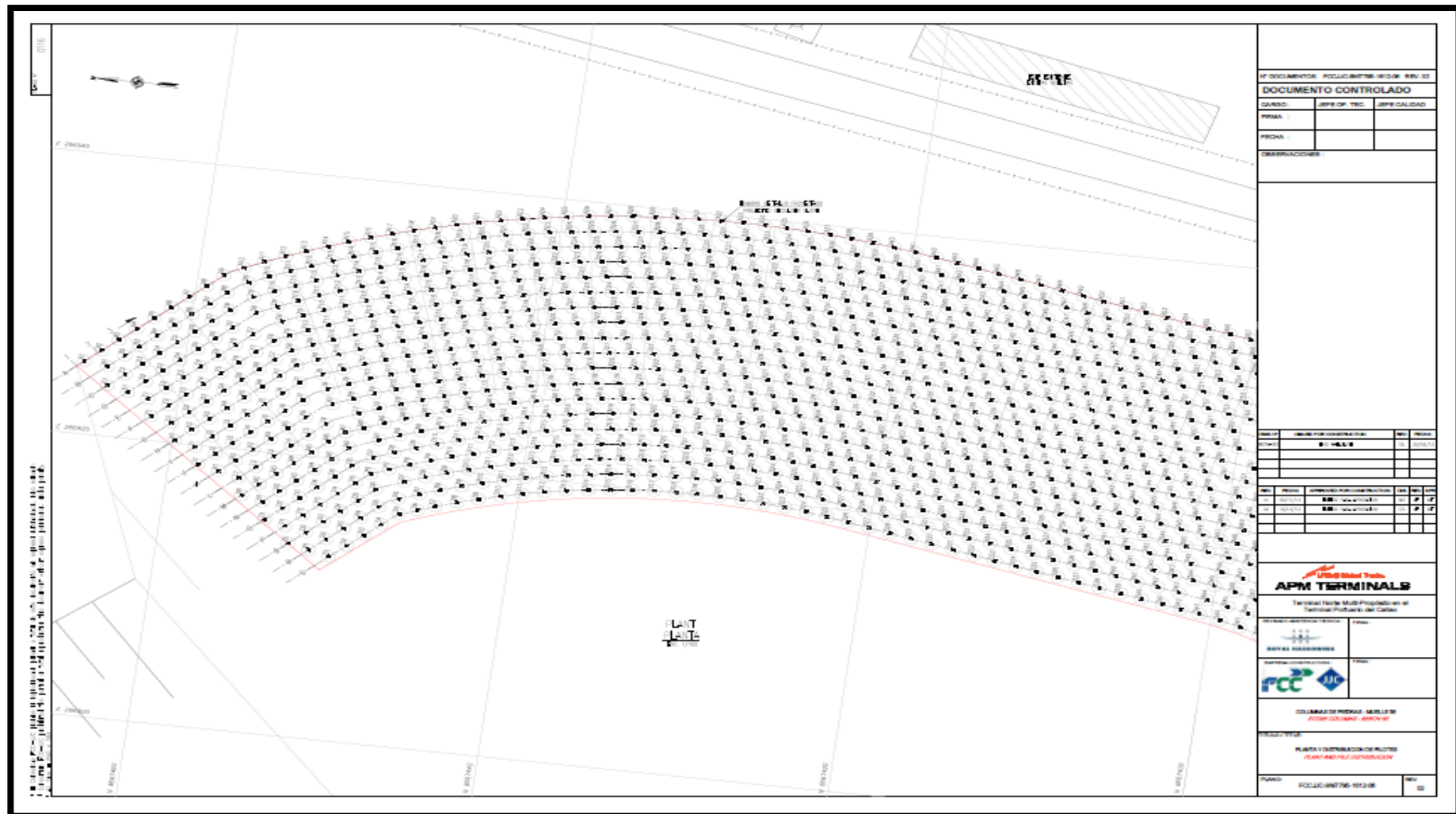
Fuente: Gobierno Regional del Callao

Panos del Talud final del muelle



Fuente: Gobierno Regional del Callao.

Plano de detalles de secciones de las columnas de grava



Fuente: Gobierno Regional del Callao.

ANEXO E: FOTOS



Fuente: APM TERMINALS



Fuente: APM TERMINALS.

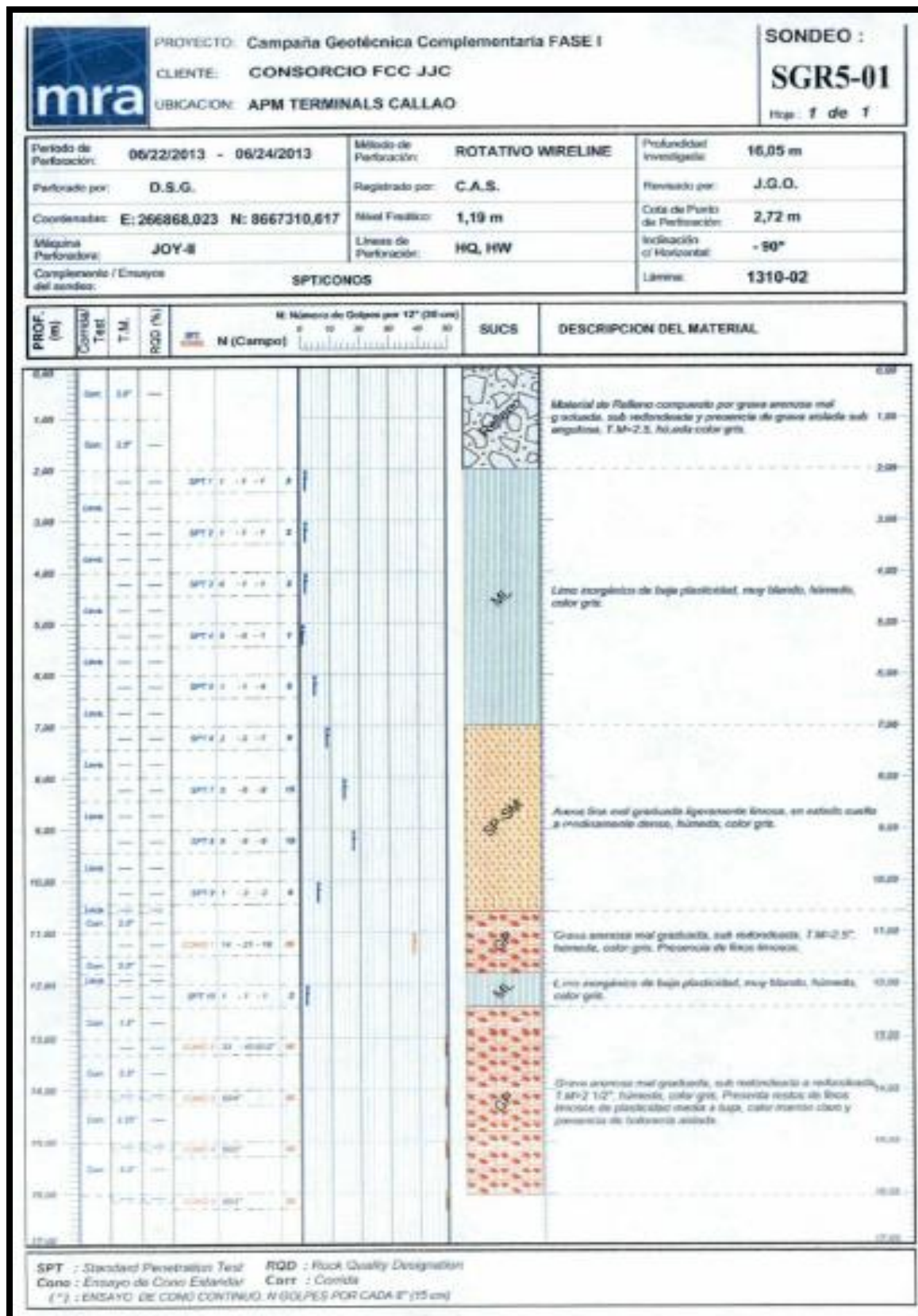


Fuente: PILOTES TERRATEST

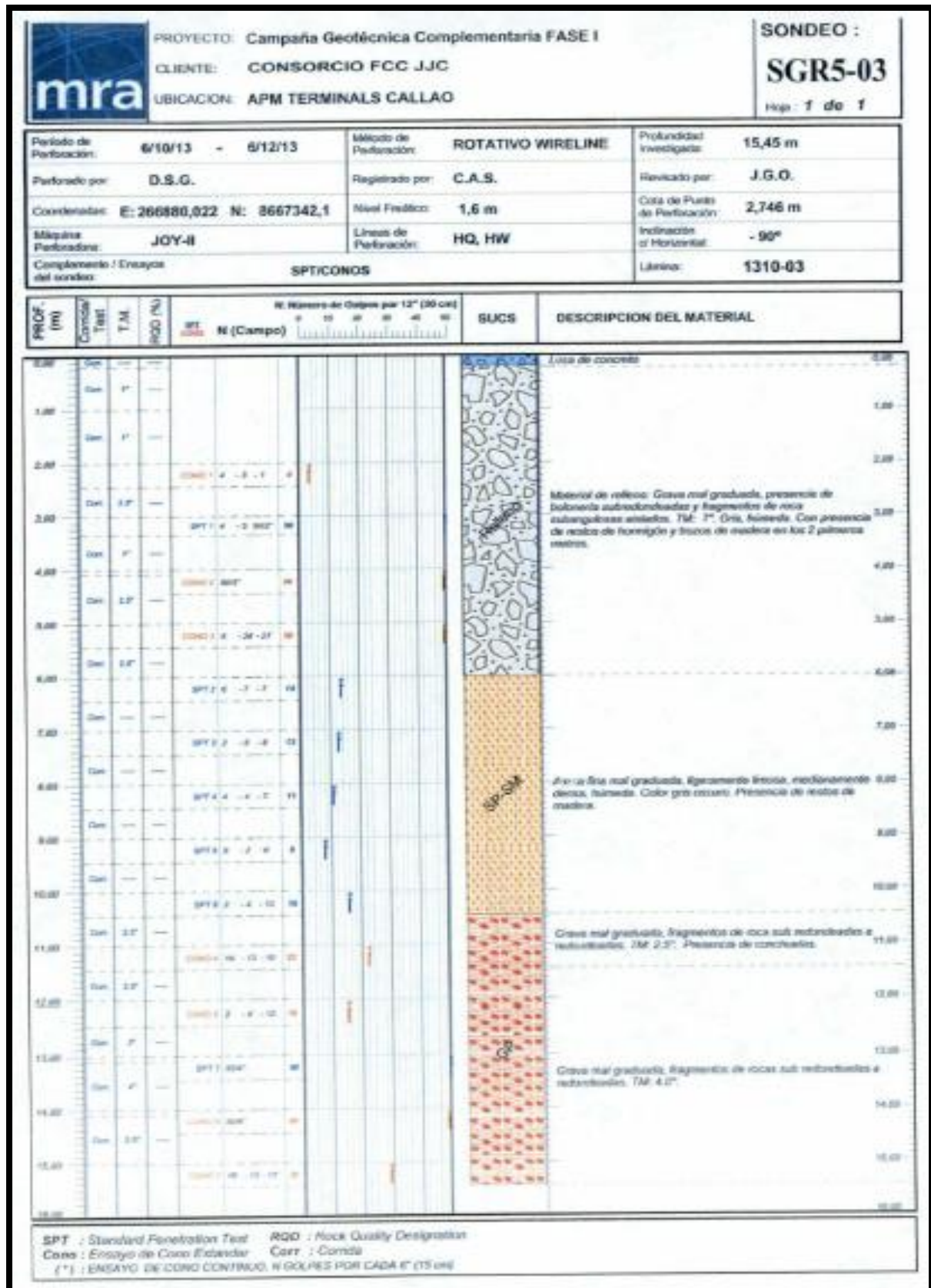


Fuente: APM TERMINALS.

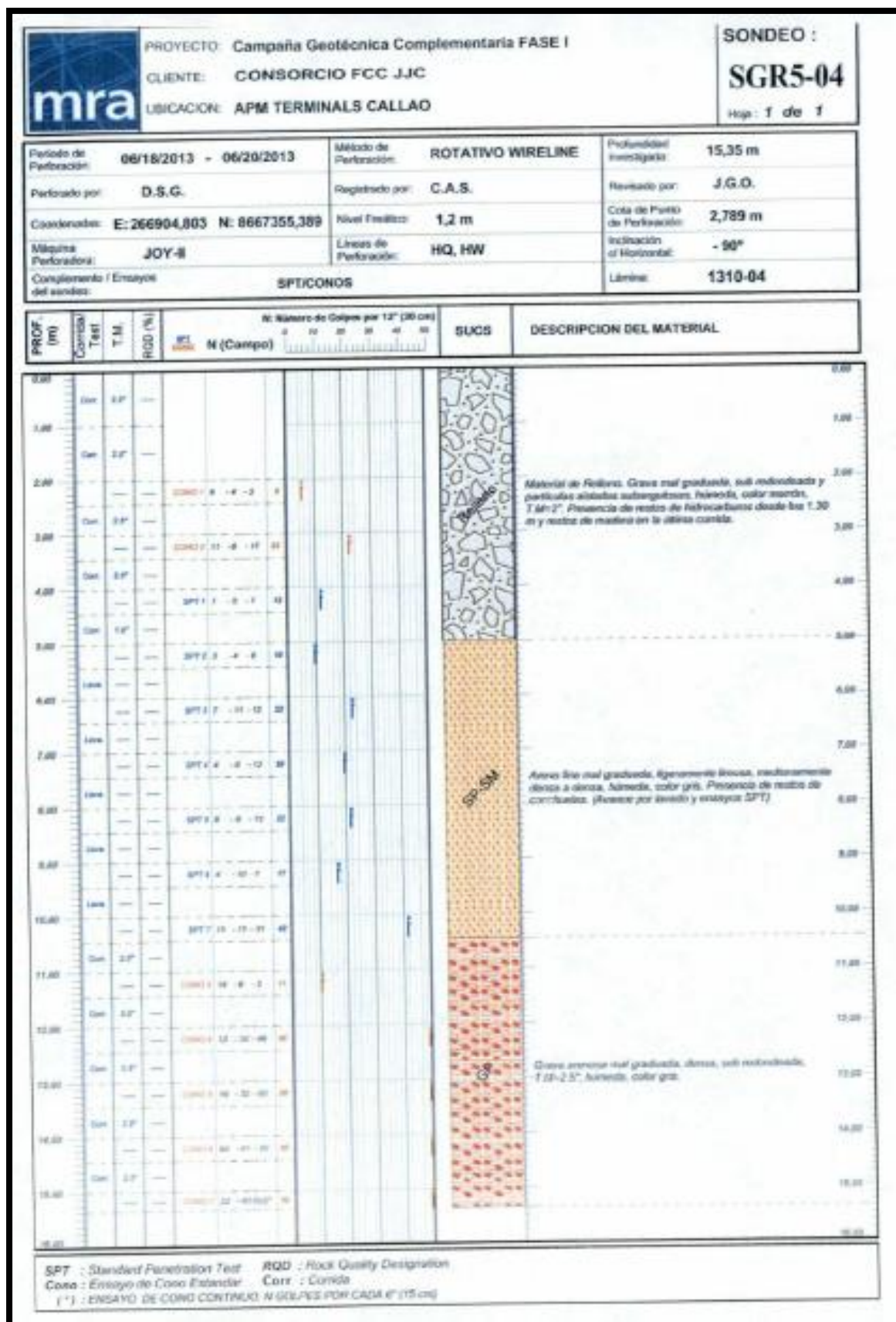
ANEXO F: SONDEOS (SGR5-01 AL AGR5-06)



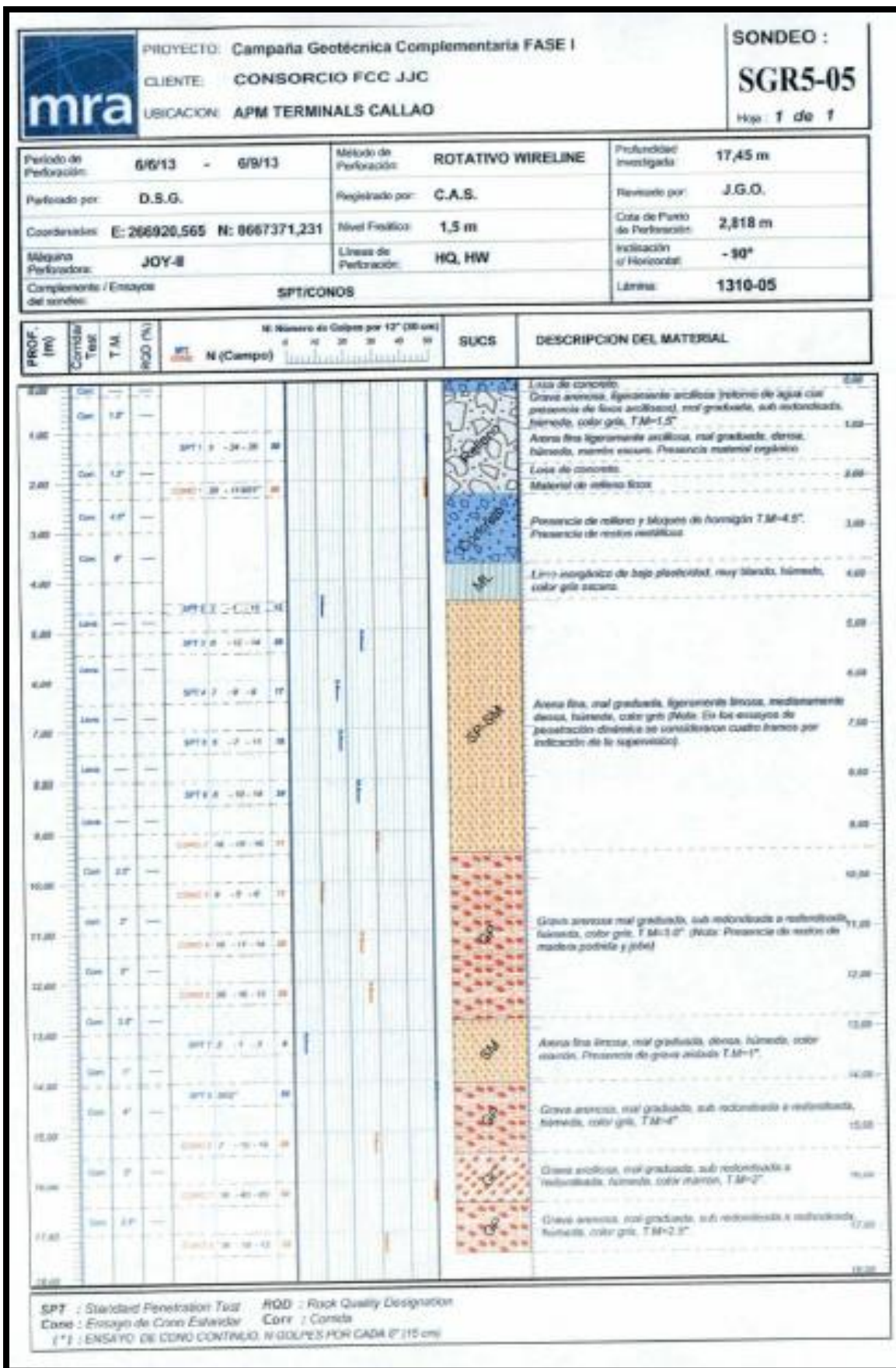
Fuente: Gobierno Regional del Callao.



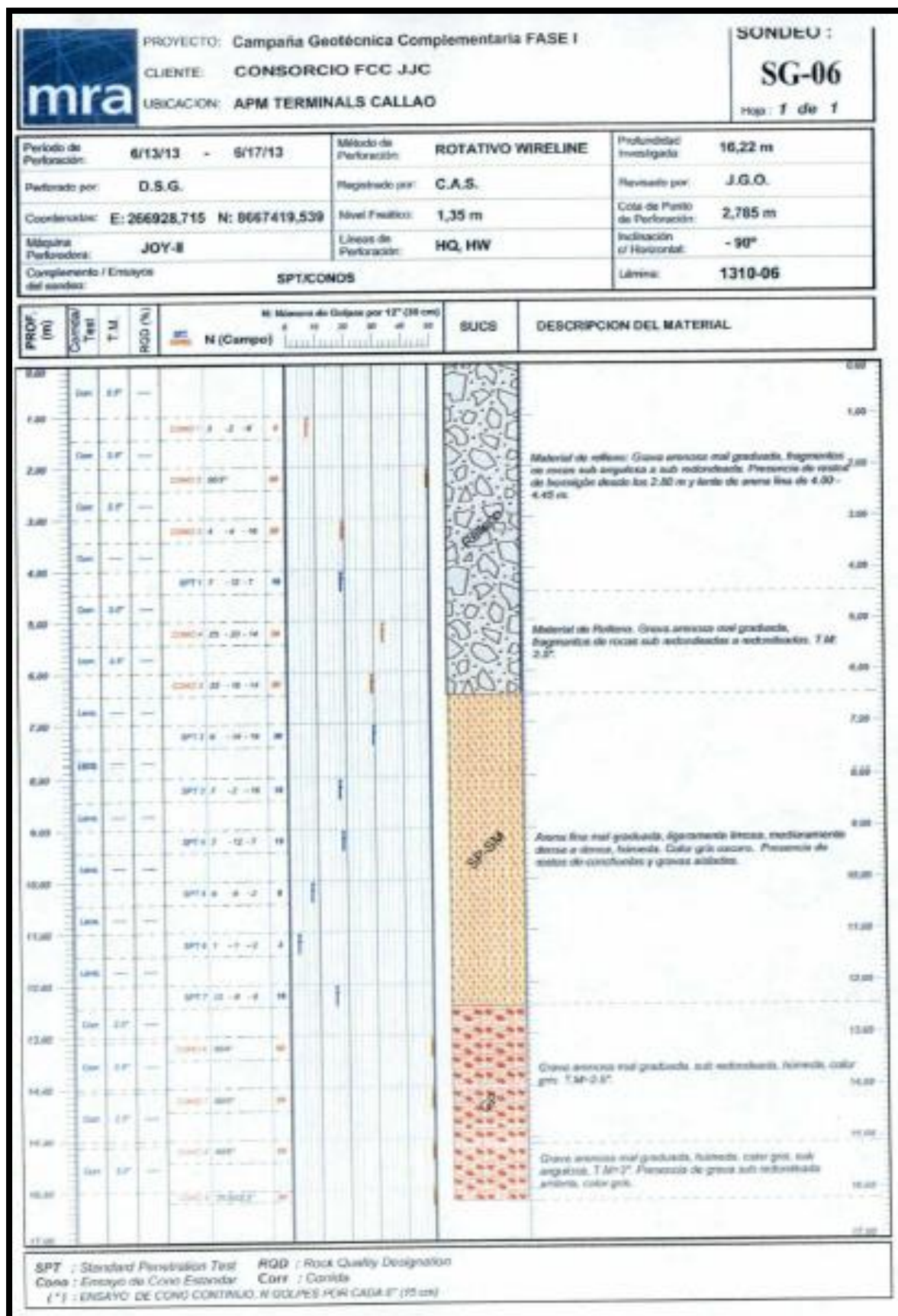
Fuente: Gobierno Regional del Callao.



Fuente: Gobierno Regional del Callao.



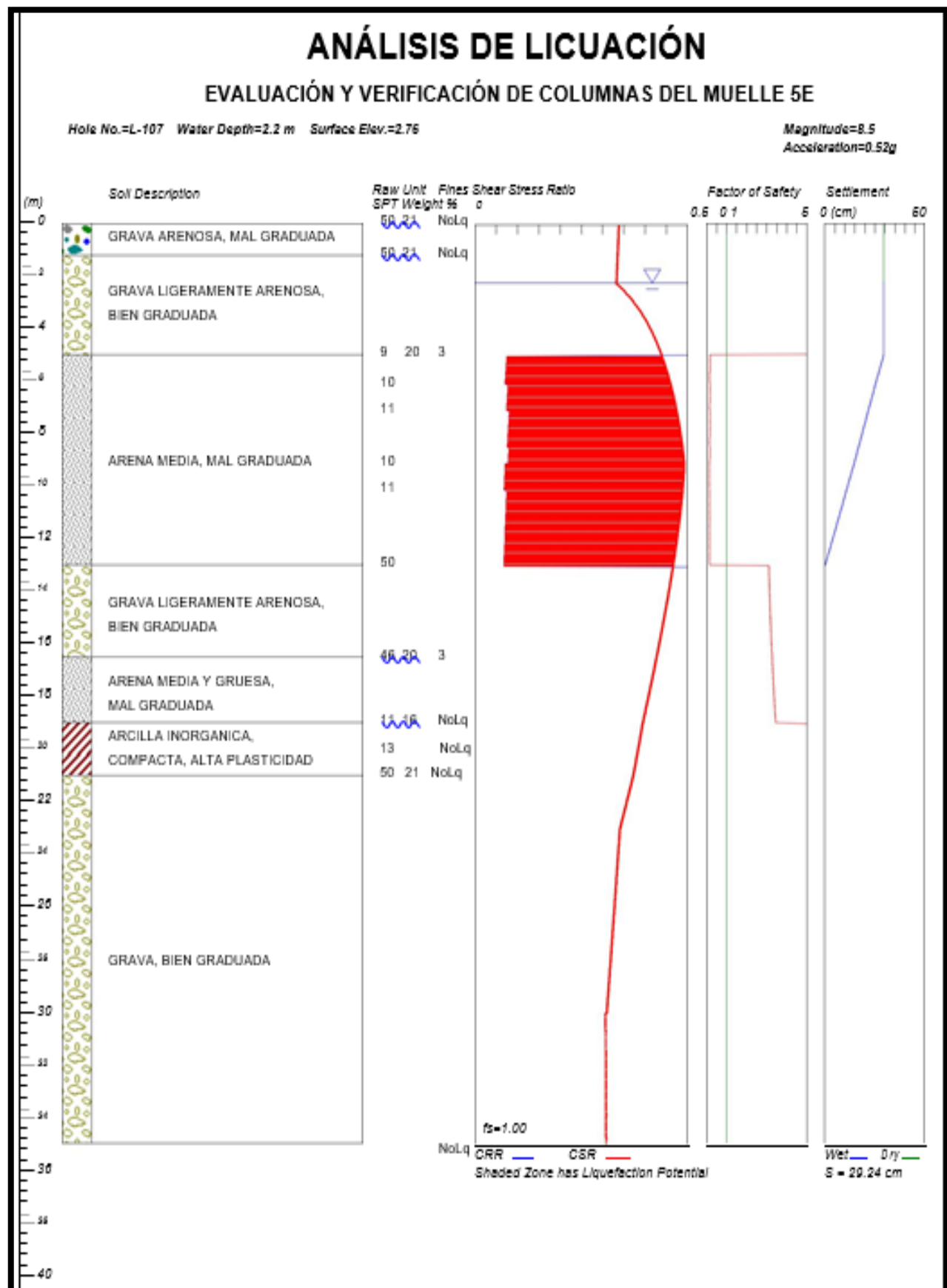
Fuente: Gobierno Regional del Callao.



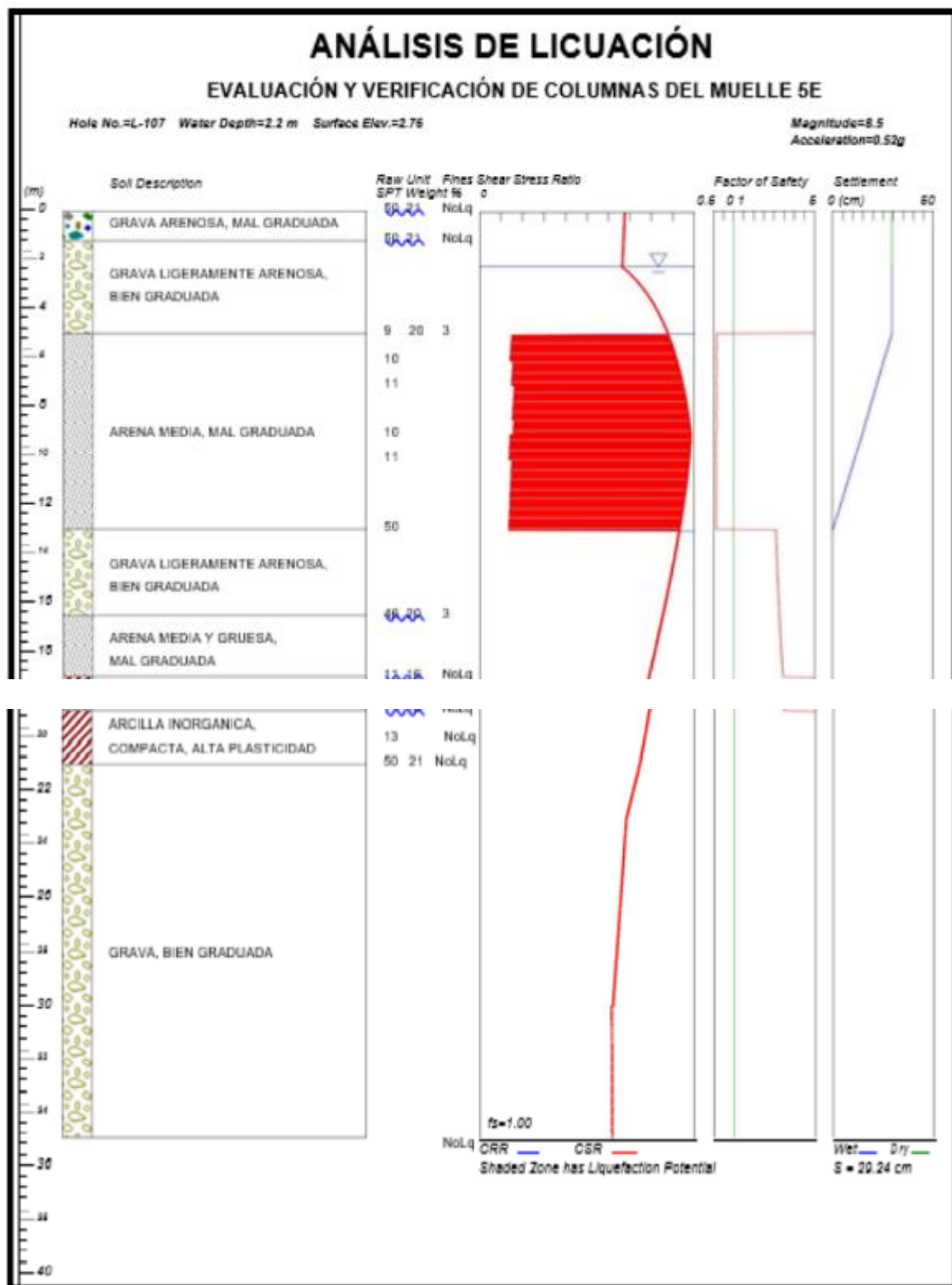
Fuente: Gobierno Regional del Callao.

ANEXO G: ANÁLISIS DE LICUACIÓN

Magnitud: 8.5, aceleración 0.52



Fuente: Gobierno Regional del Callao.



Fuente: Gobierno Regional del Callao.

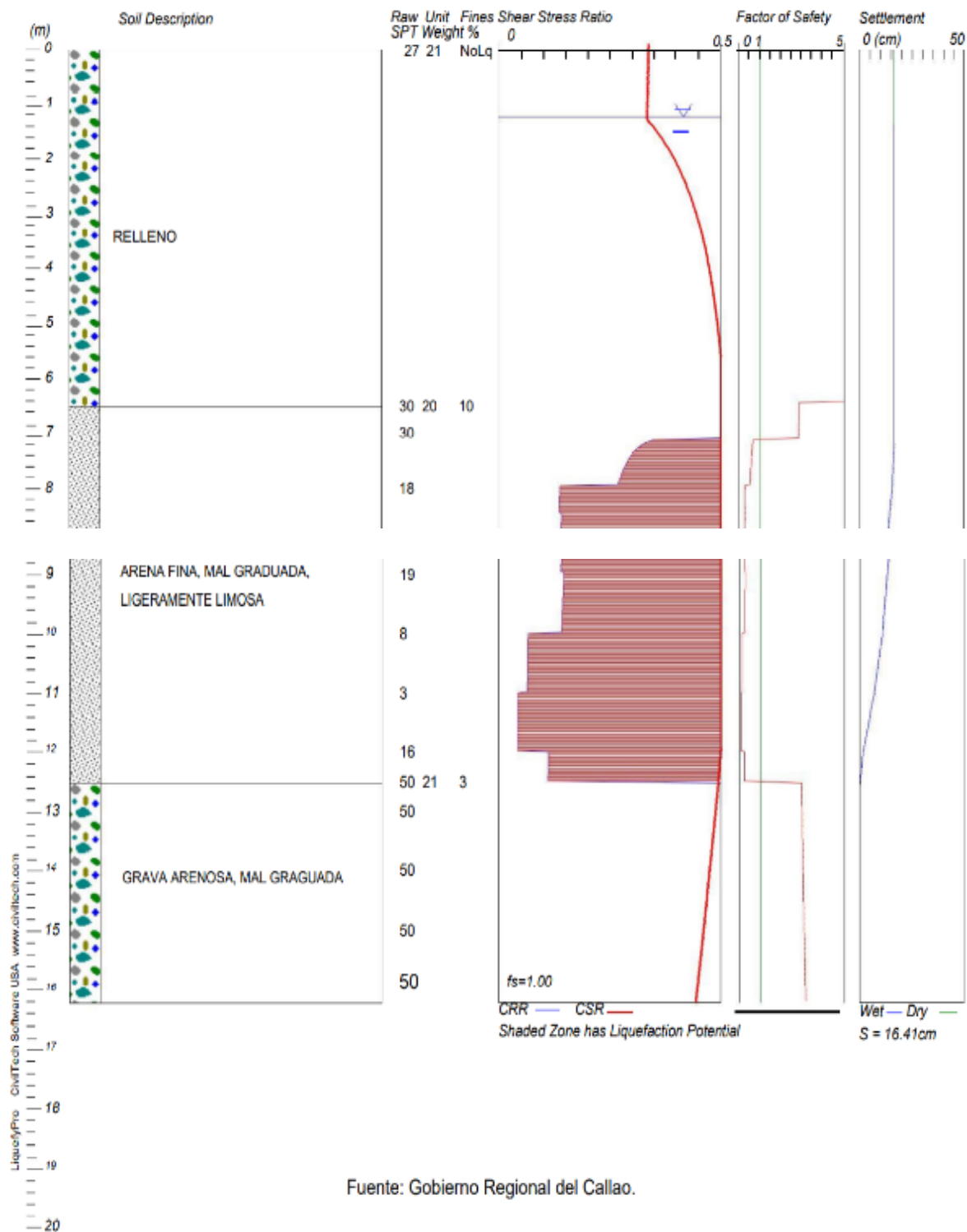
ANÁLISIS DE LICUACIÓN

EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN DE COLUMNAS DEL MUELLE 5E

Hole No.=SG-06 Water Depth=1.35 m Surface Elev.=2.79

Magnitude=8.5

Acceleration=0.52g

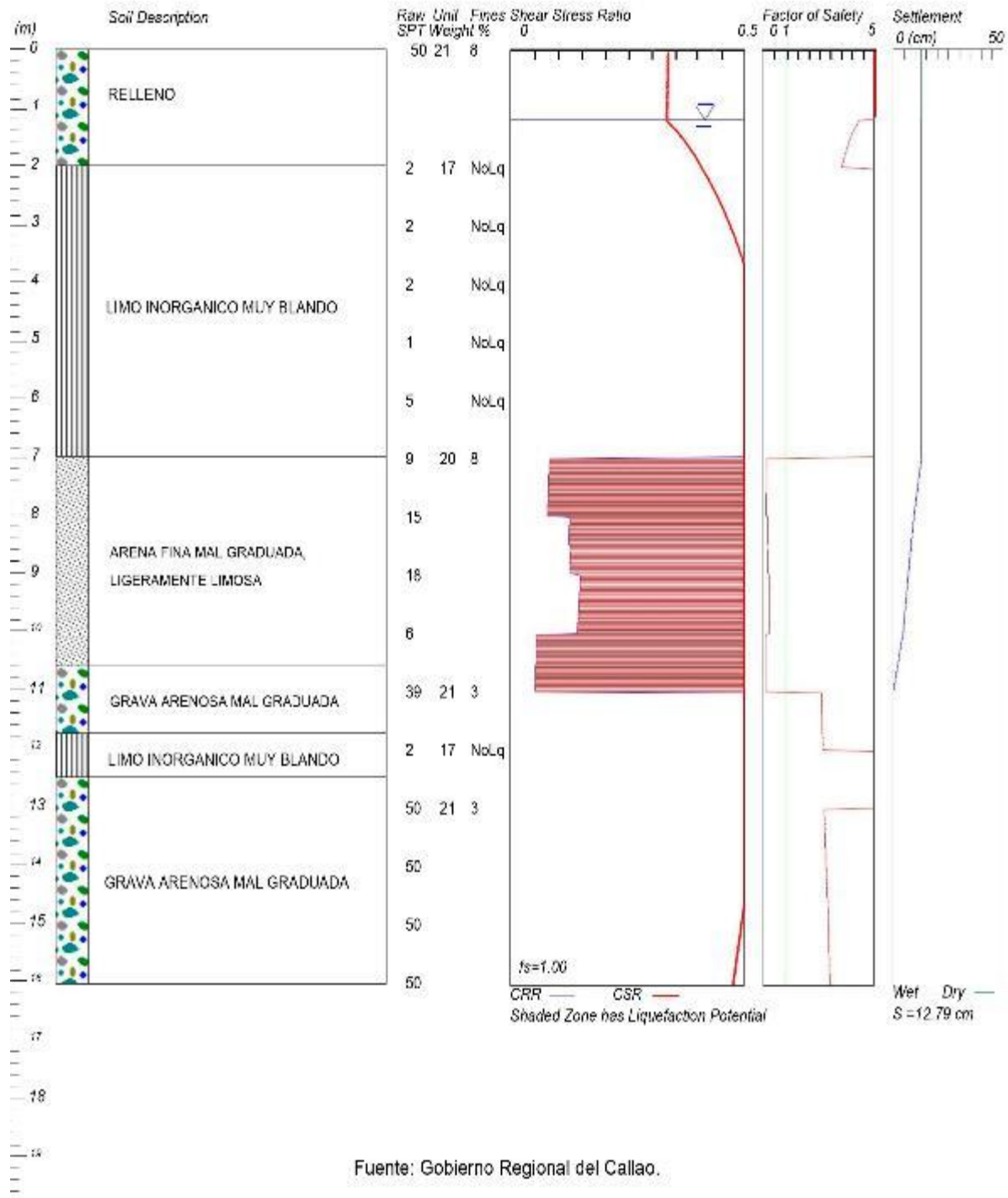


ANÁLISIS DE LICUACIÓN

EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN DE COLUMNAS DEL MUELLE 5E

Hole No.=SGR5-01 Water Depth=1.19 m Surface Elev.=2.72

Magnitude=8.5
Acceleration=0.52g



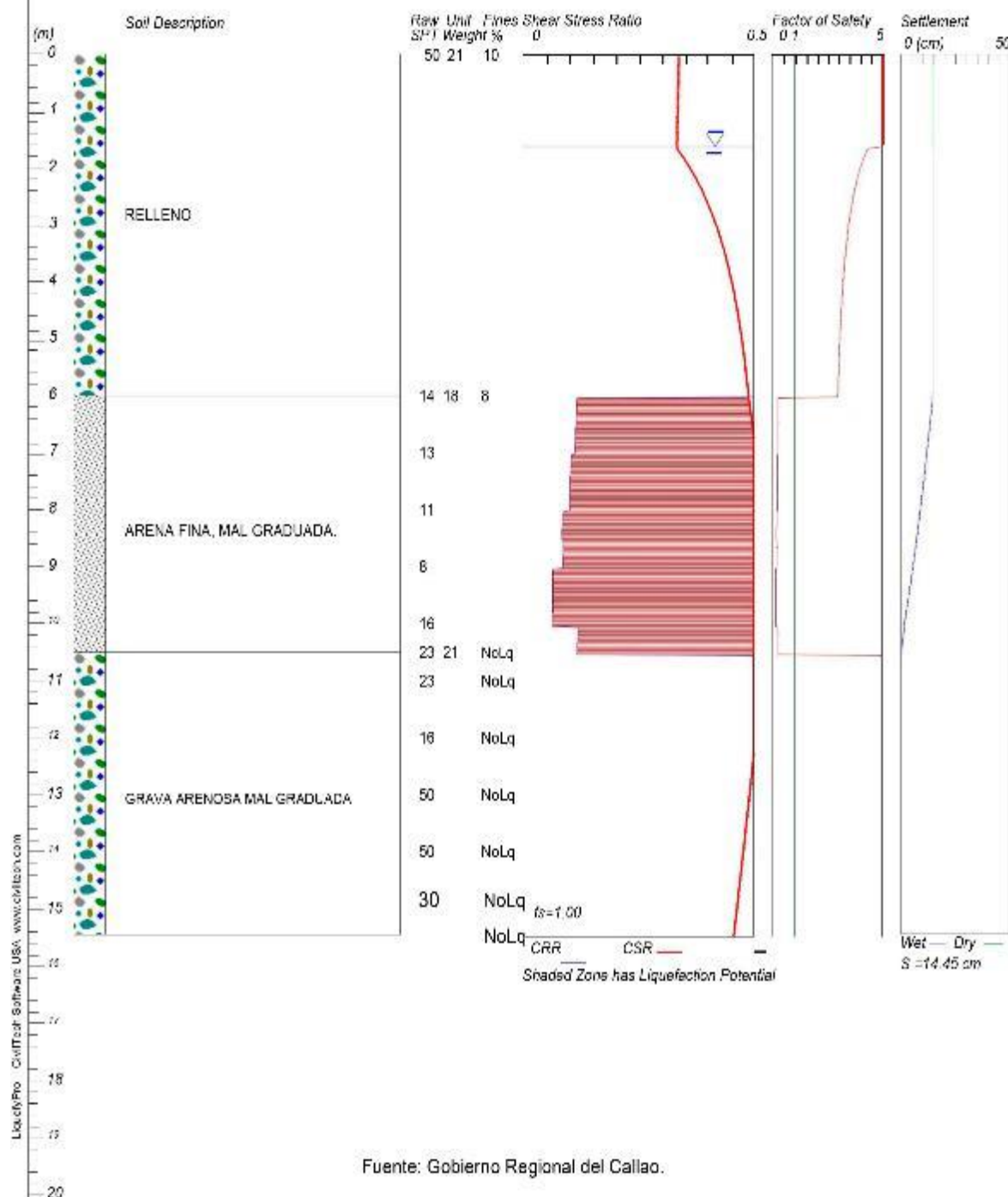
Fuente: Gobierno Regional del Callao.

ANÁLISIS DE LICUACIÓN

EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN DE COLUMNAS DEL MUELLE 5E

Hole No.=SGR5-03 Water Depth=1.6 m Surface Elev.=2.75

Magnitude=8.5
Acceleration=0.52g

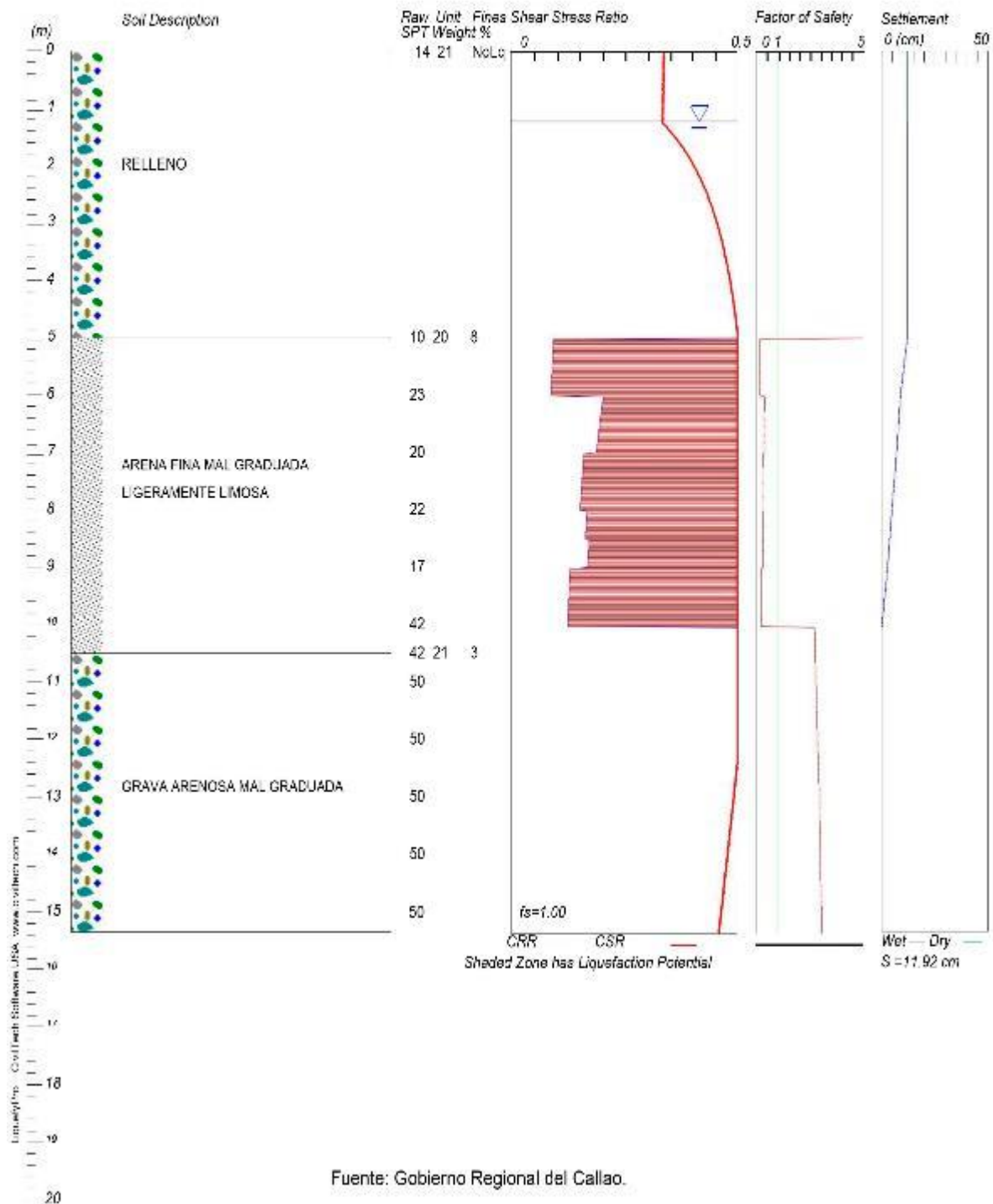


ANÁLISIS DE LICUACIÓN

EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN DE COLUMNAS DEL MUELLE 5E

Hole No.=SGR5-04 Water Depth=1.2 m Surface Elev.=2.79

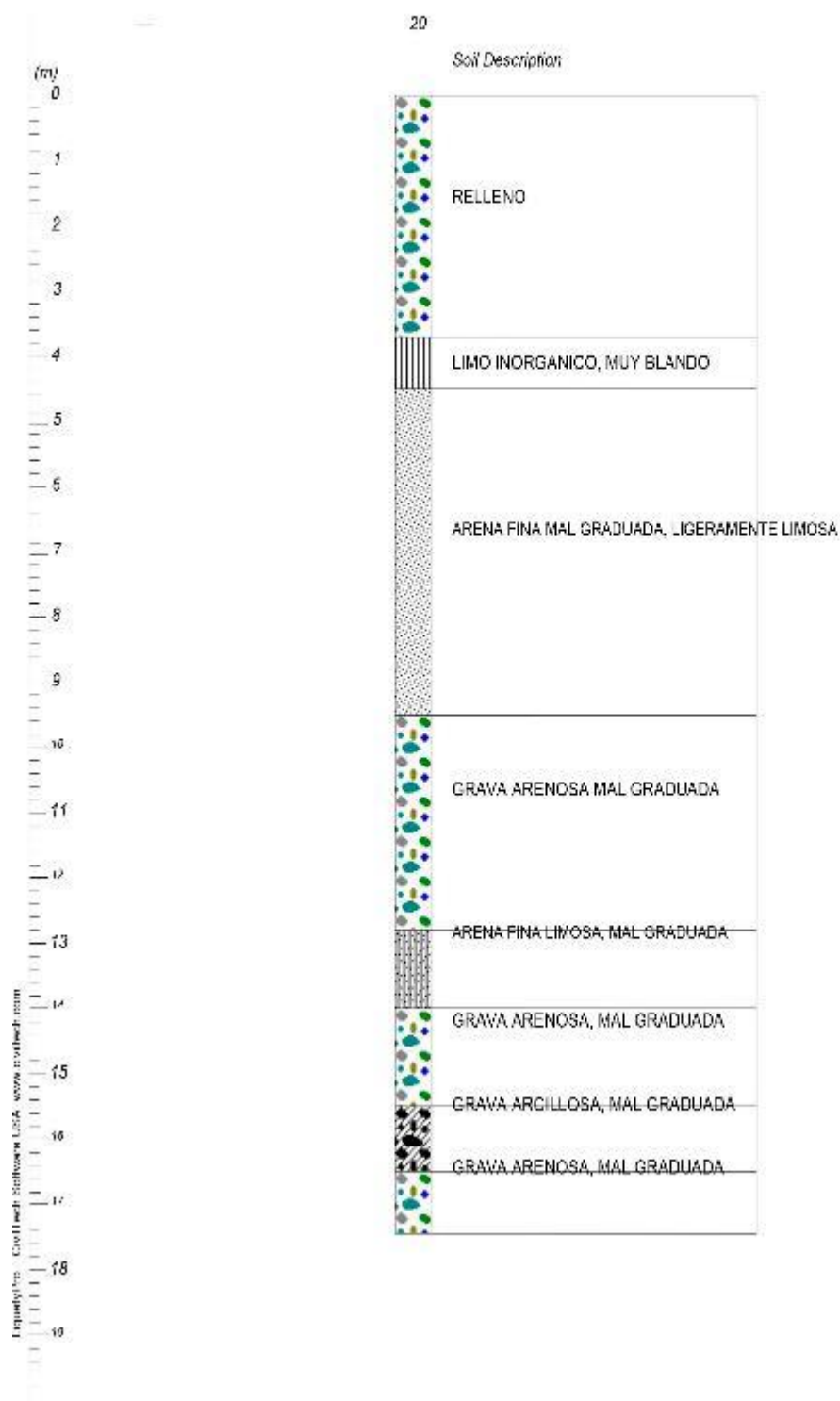
Magnitude=8.5
Acceleration=0.52g



ANÁLISIS DE LICUACIÓN

EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN DE COLUMNAS DEL MUELLE 5E

Hole No.=SGR5-05 Water Depth=1.5 m Surface Elev.=2.82



ANEXO H: ANÁLISIS DE LICUACIÓN

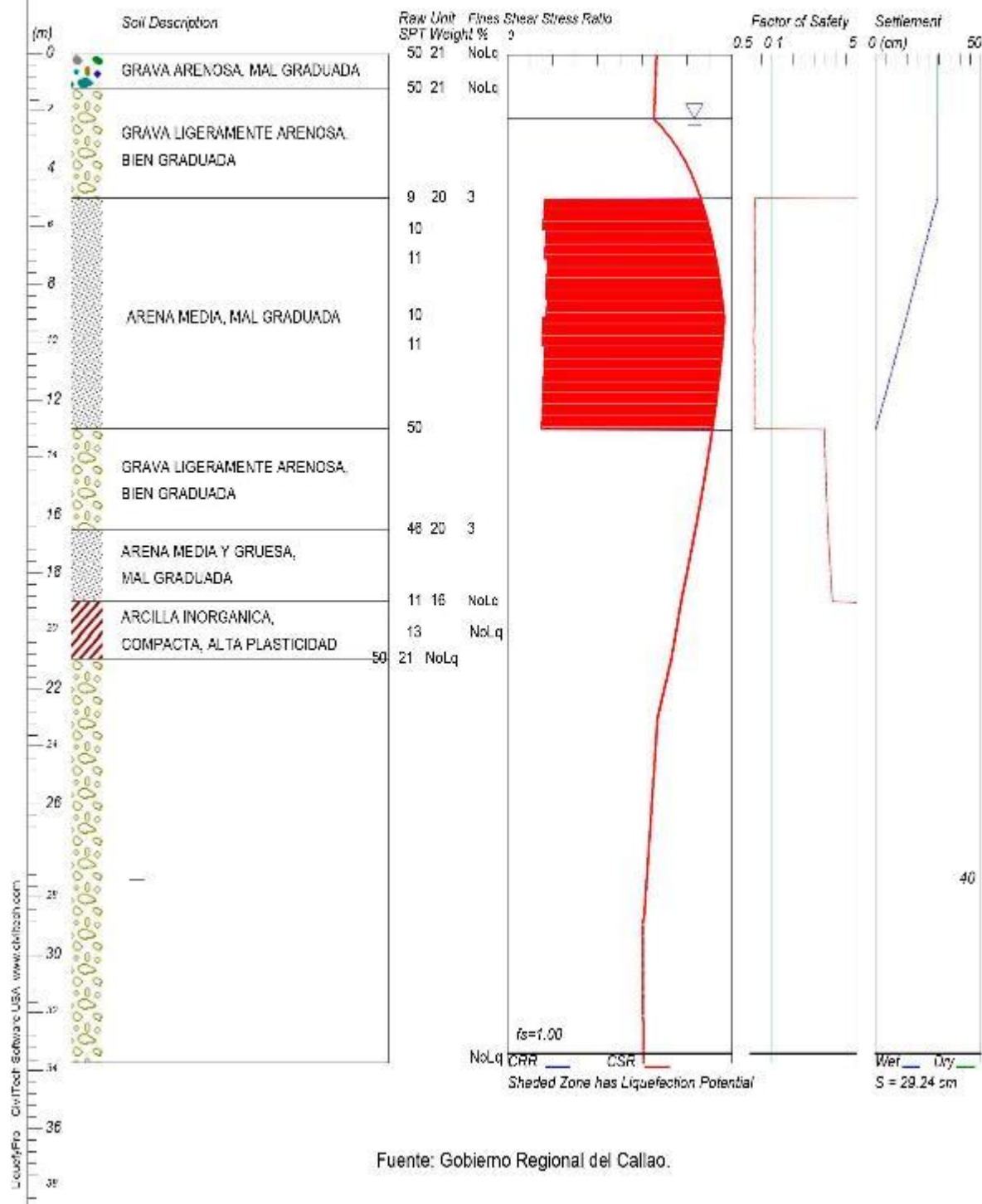
Magnitud: 8.2, aceleración 0.51g

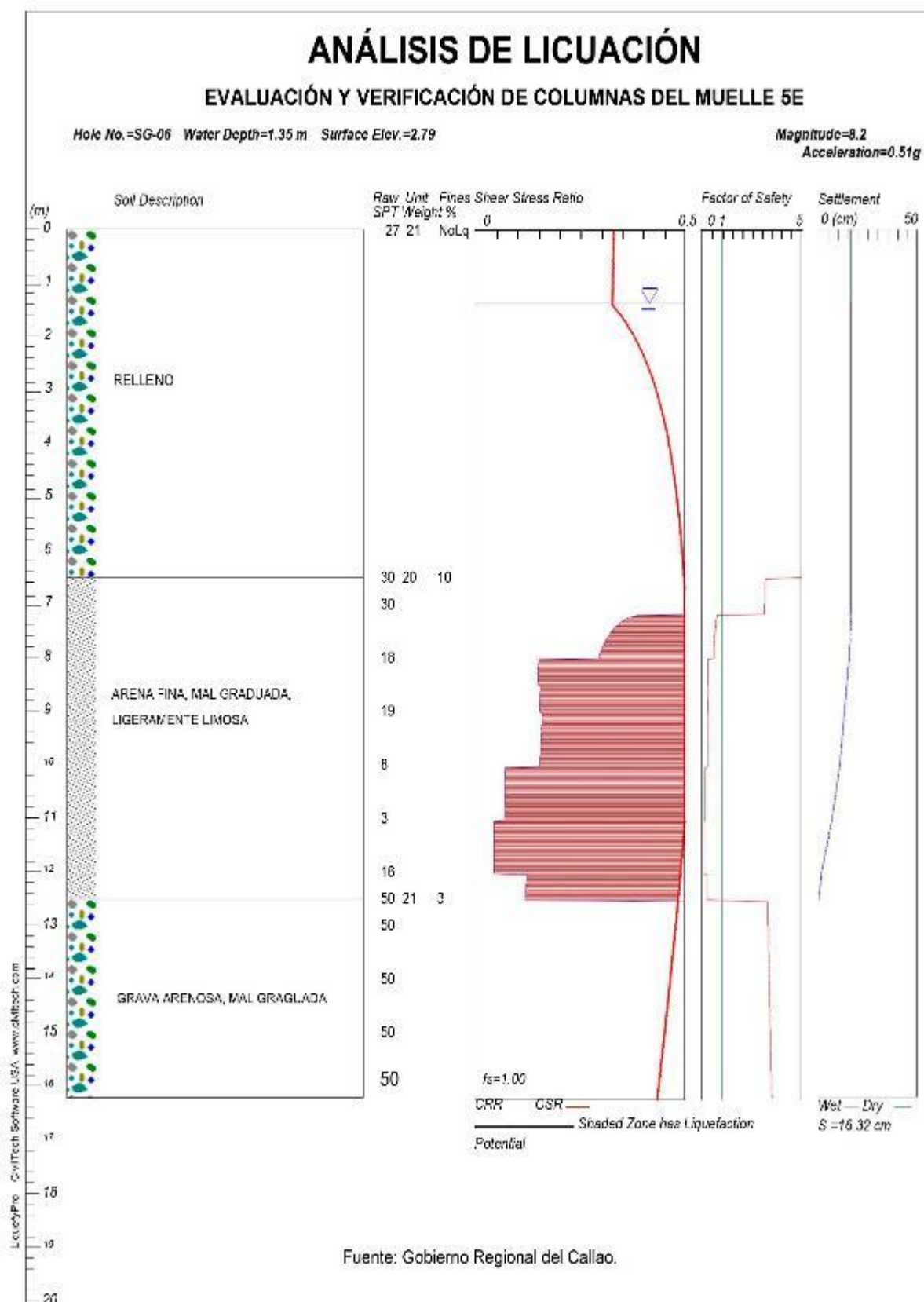
ANÁLISIS DE LICUACIÓN

EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN DE COLUMNAS DEL MUELLE 5E

Hole No.=L-107 Water Depth=2.2 m Surface Elev.=2.76

Magnitude=8.2
Acceleration=0.51g





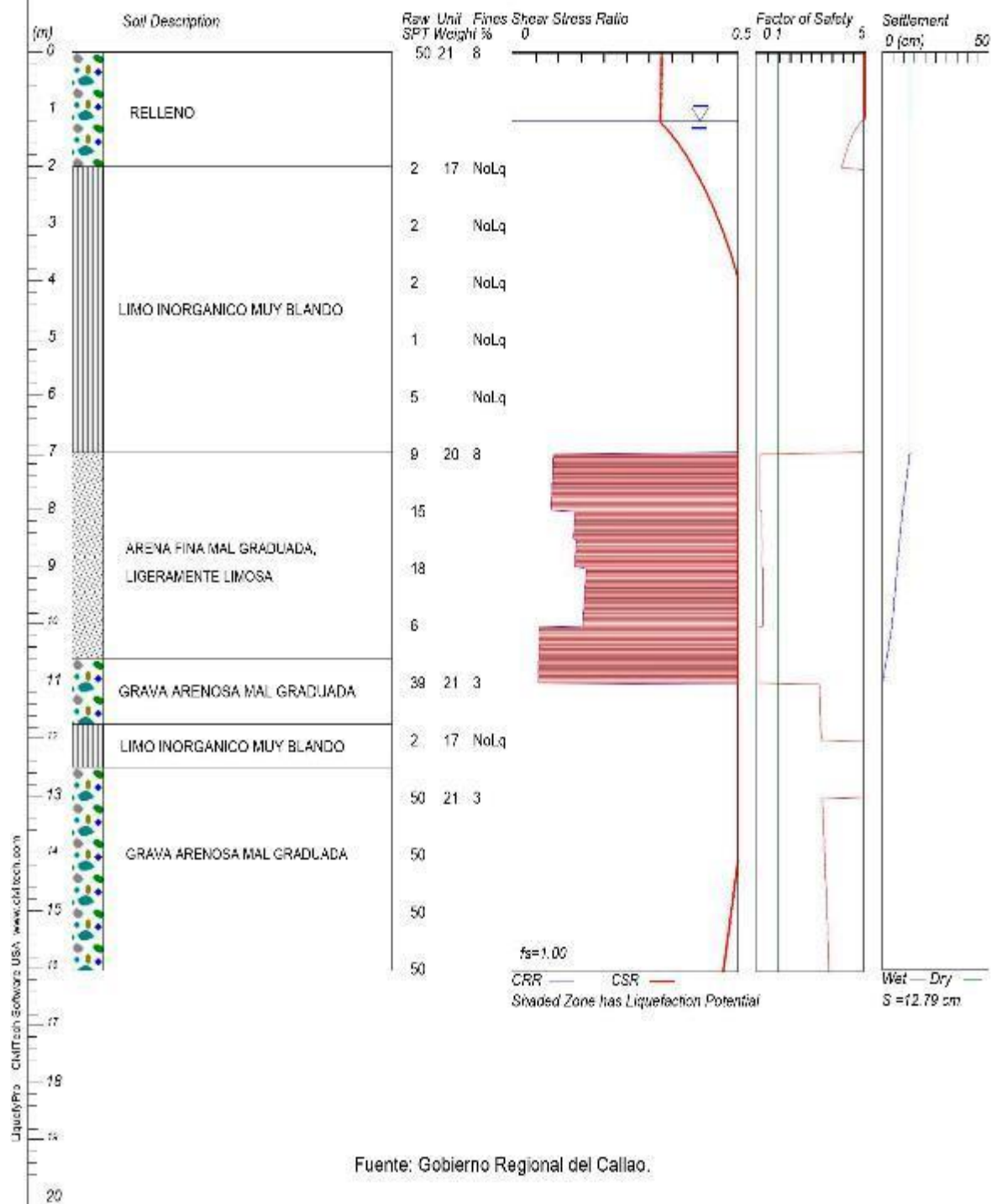
ANÁLISIS DE LICUACIÓN

EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN DE COLUMNAS DEL MUELLE 5E

Hole No.=SGR5-01 Water Depth=1.19 m Surface Elev.=2.72

Magnitude=8.2

Acceleration=0.51g



Fuente: Gobierno Regional del Callao.

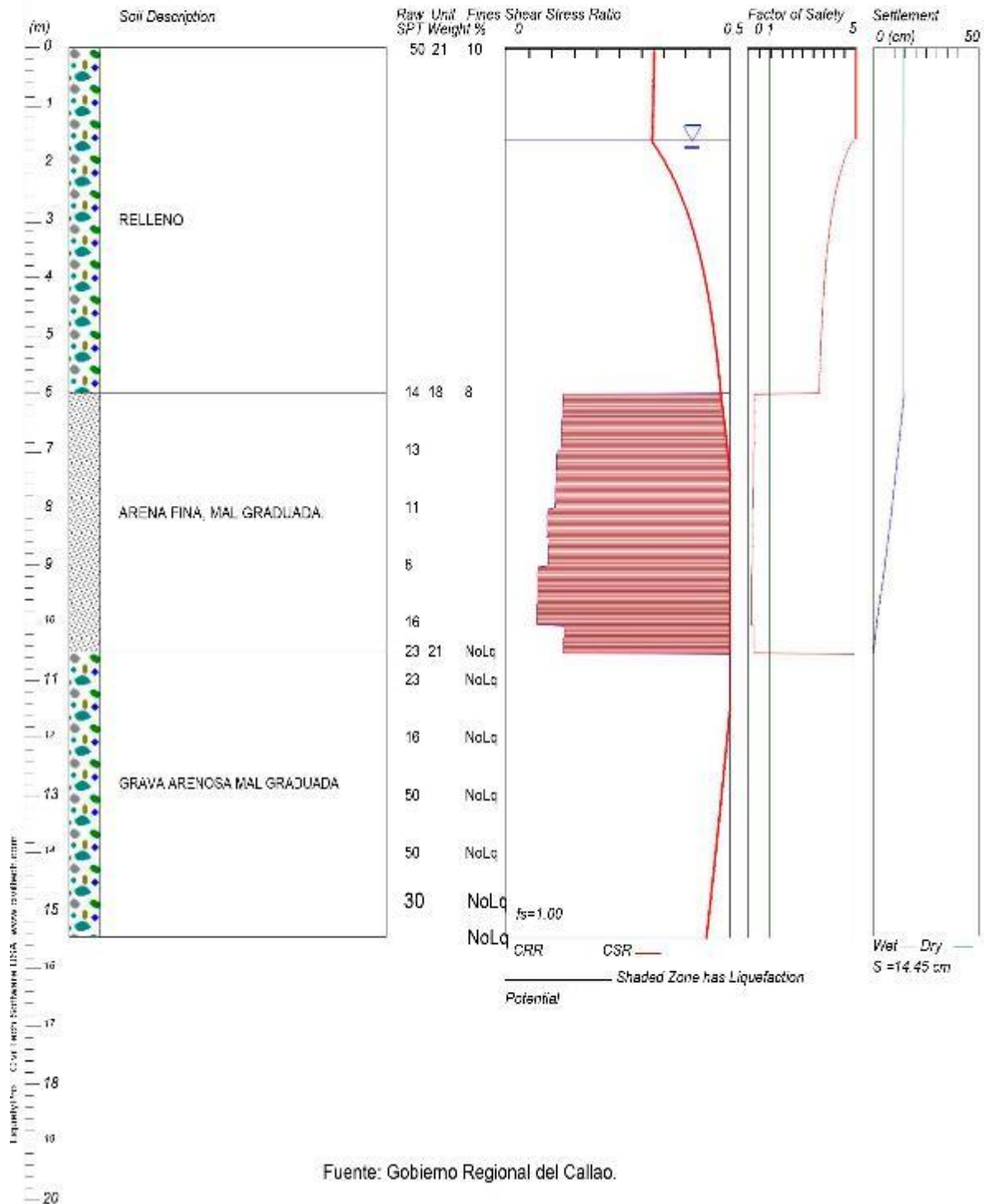
ANÁLISIS DE LICUACIÓN

EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN DE COLUMNAS DEL MUELLE 5E

Hole No.=SGR5-03 Water Depth=1.6 m Surface Elev.=2.75

Magnitude=8.2

Acceleration=0.51g

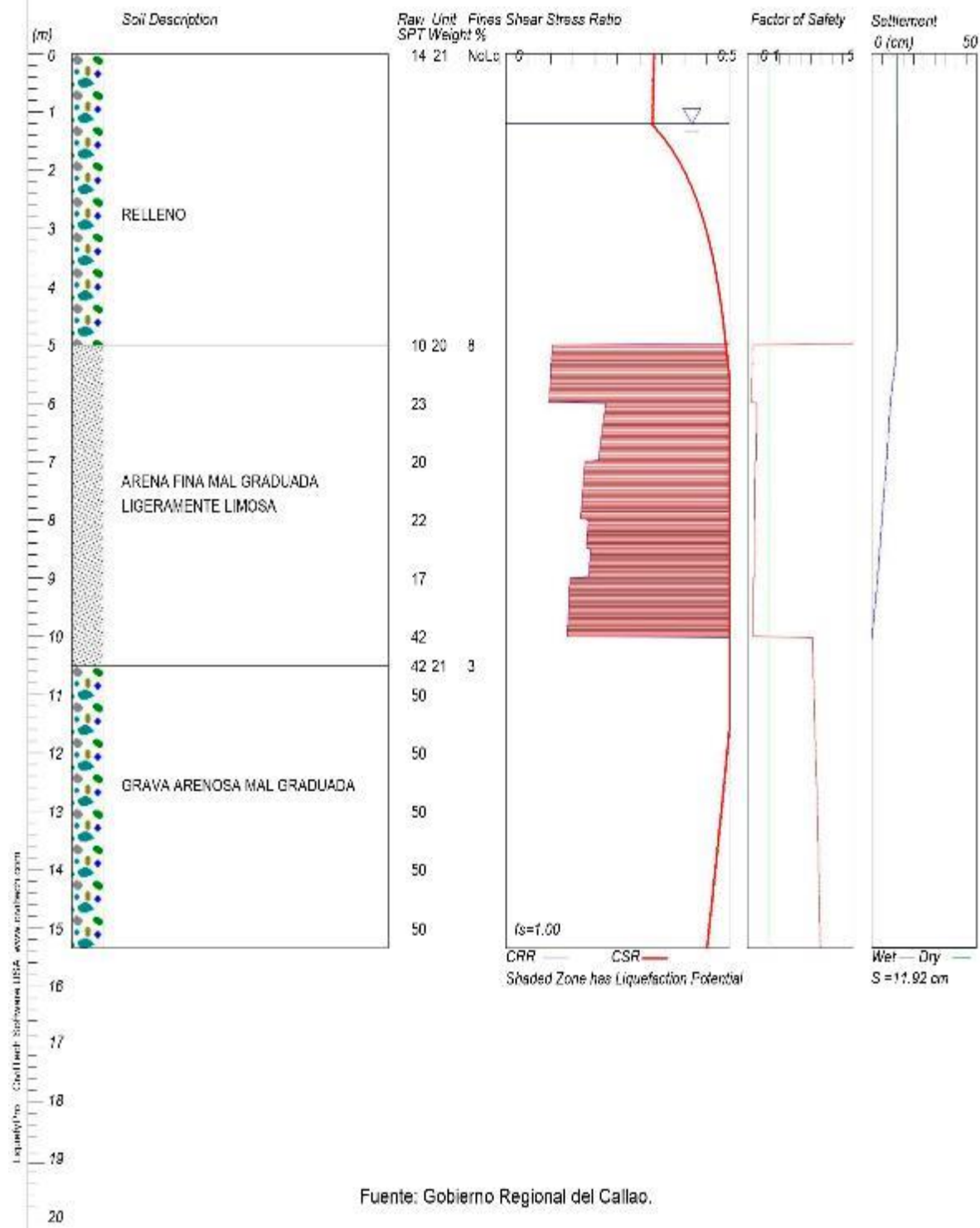


ANÁLISIS DE LICUACIÓN

EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN DE COLUMNAS DEL MUELLE 5E

Hole No.=SGR5-04 Water Depth=1.2 m Surface Elev.=2.79

Magnitude=8.2
Acceleration=0.51g



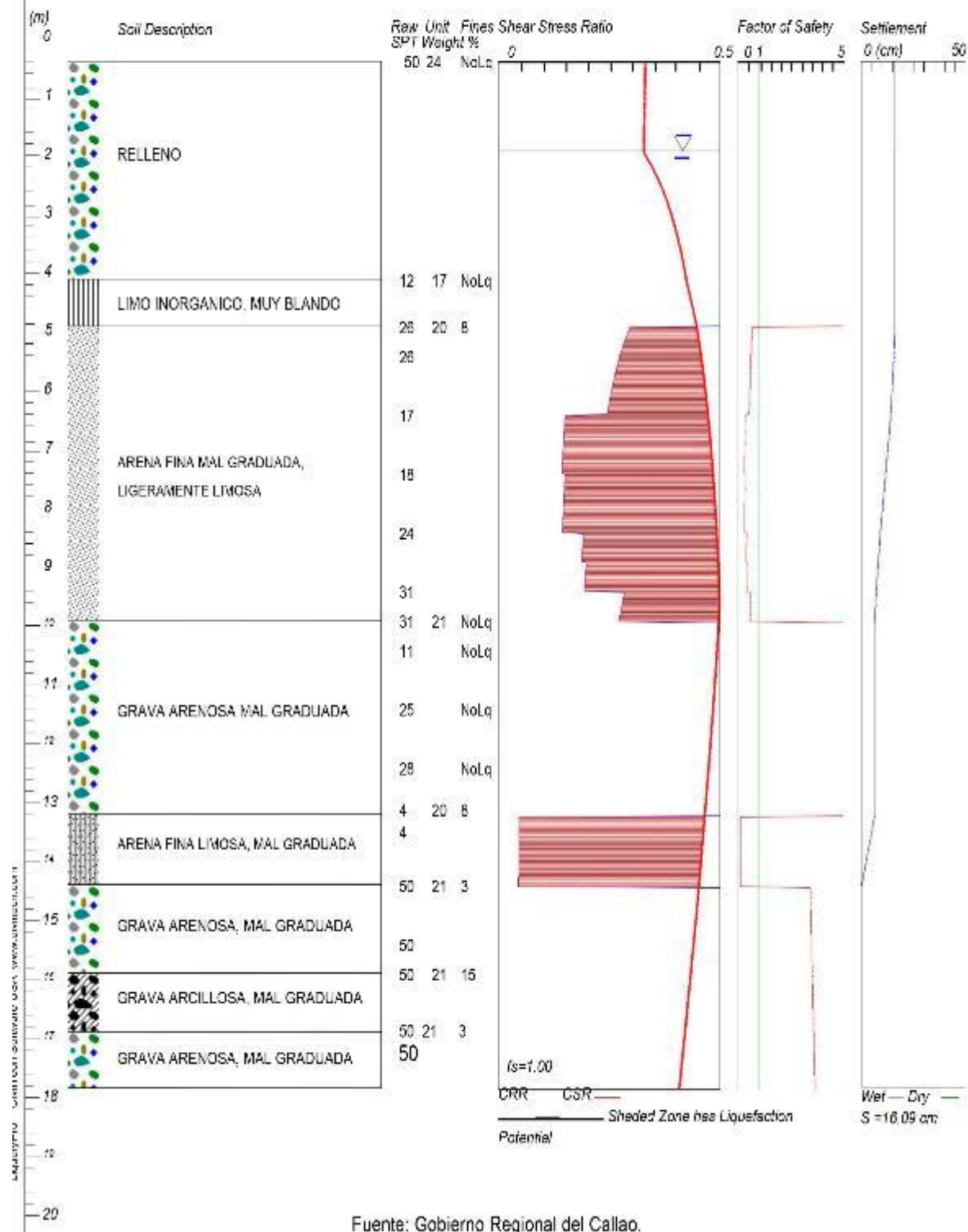
ANÁLISIS DE LICUACIÓN

EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN DE COLUMNAS DEL MUELLE 5E

Hole No.=SGR5-05 Water Depth=1.5 m Surface Elev.=2.82

Magnitude=8.2

Acceleration=0.51g



ANEXO I: ANÁLISIS DE LICUACIÓN

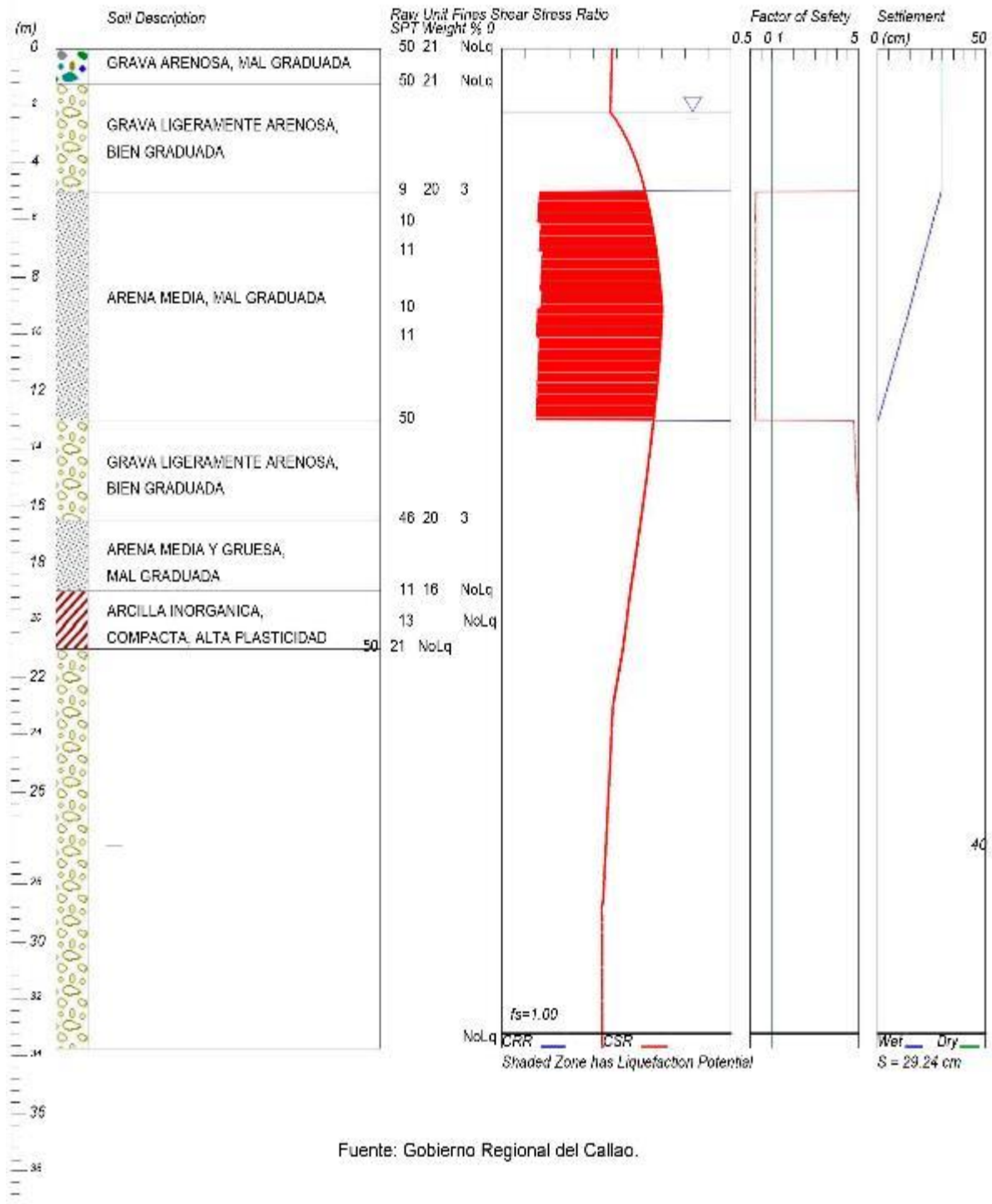
Magnitud: 8.2, aceleración 0.37g

ANÁLISIS DE LICUACIÓN

EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN DE COLUMNAS DEL MUELLE 5E

Hole No.=L-107 Water Depth=2.2 m Surface Elev.=2.76

Magnitude=8.2
Acceleration=0.37g

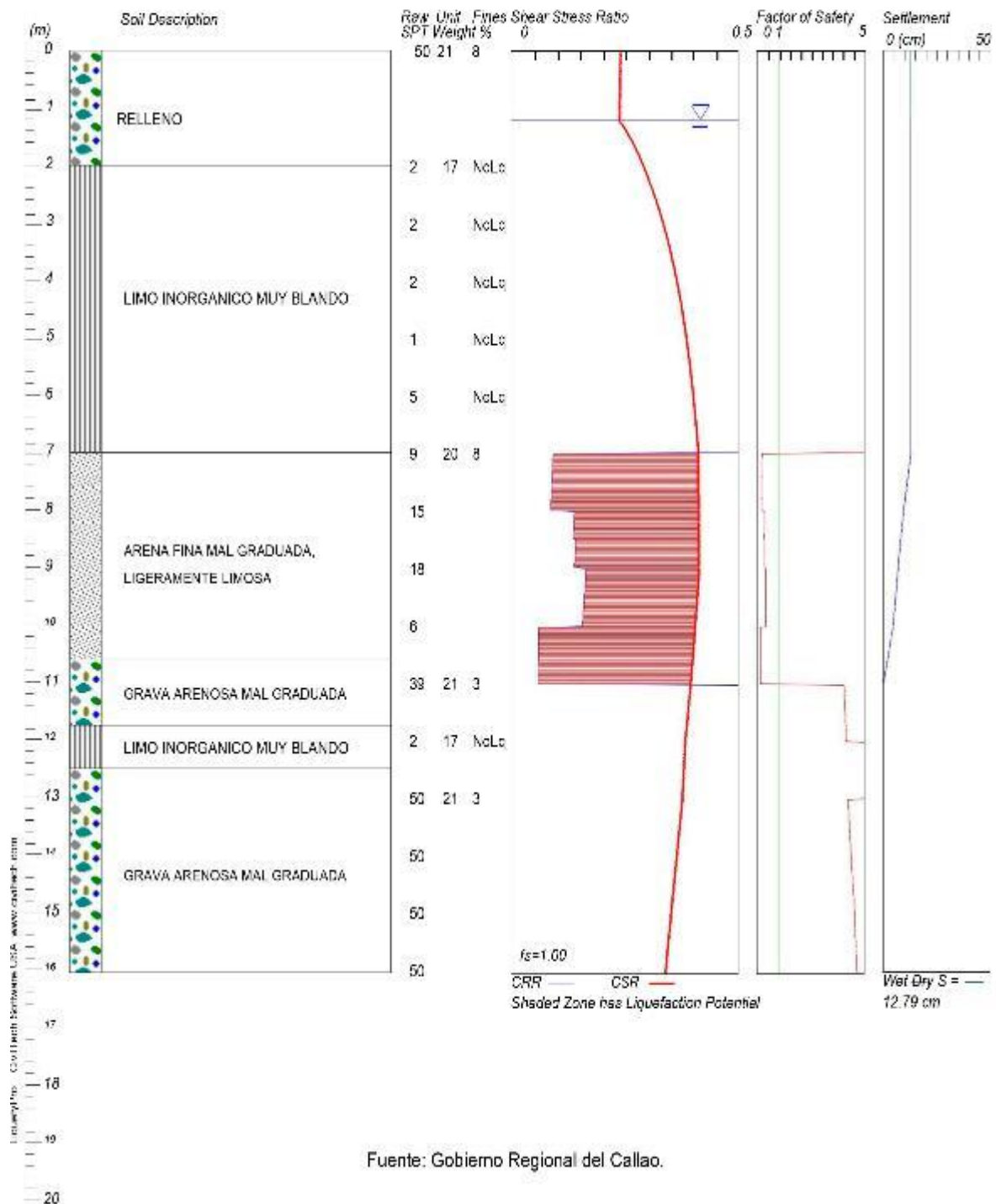


ANÁLISIS DE LICUACIÓN

EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN DE COLUMNAS DEL MUELLE 5E

Hole No.=SGR5-01 Water Depth=1.19 m Surface Elev.=2.72

Magnitude=8.2
Acceleration=0.37g



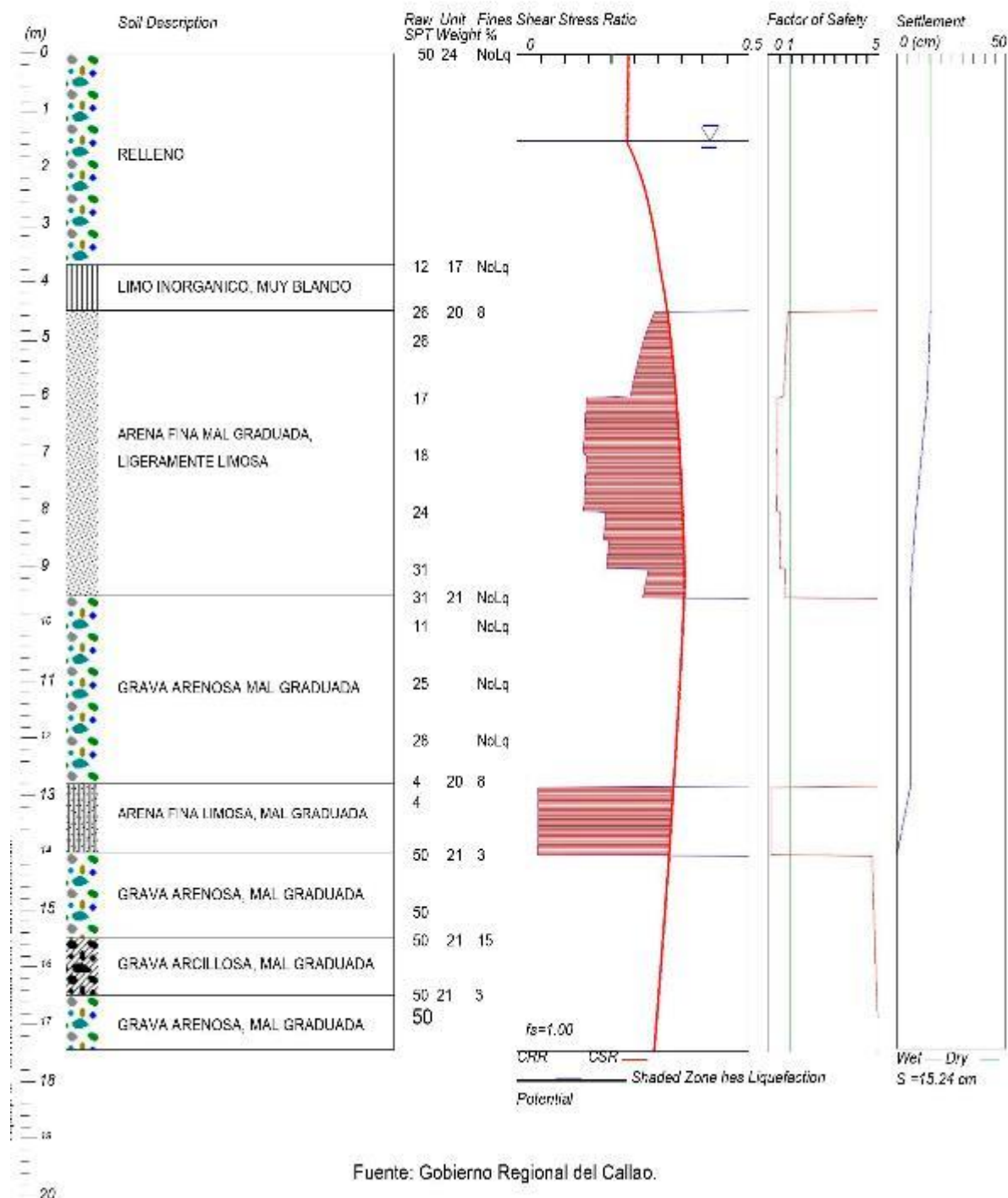
Fuente: Gobierno Regional del Callao.

ANÁLISIS DE LICUACIÓN

EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN DE COLUMNAS DEL MUELLE 5E

Hole No.=SGR5-05 Water Depth=1.5 m Surface Elev.=2.82

Magnitude=8.2
Acceleration=0.37g

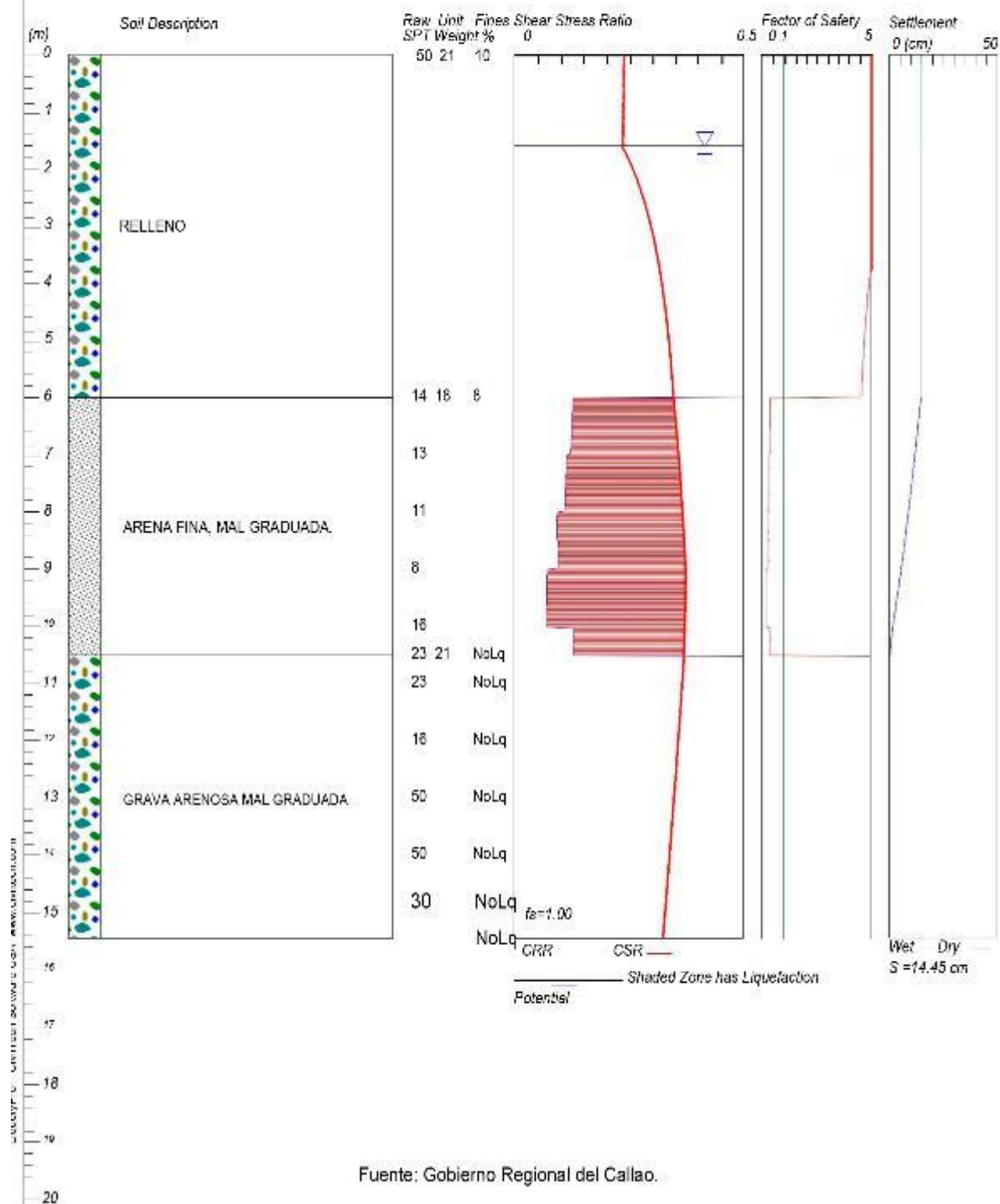


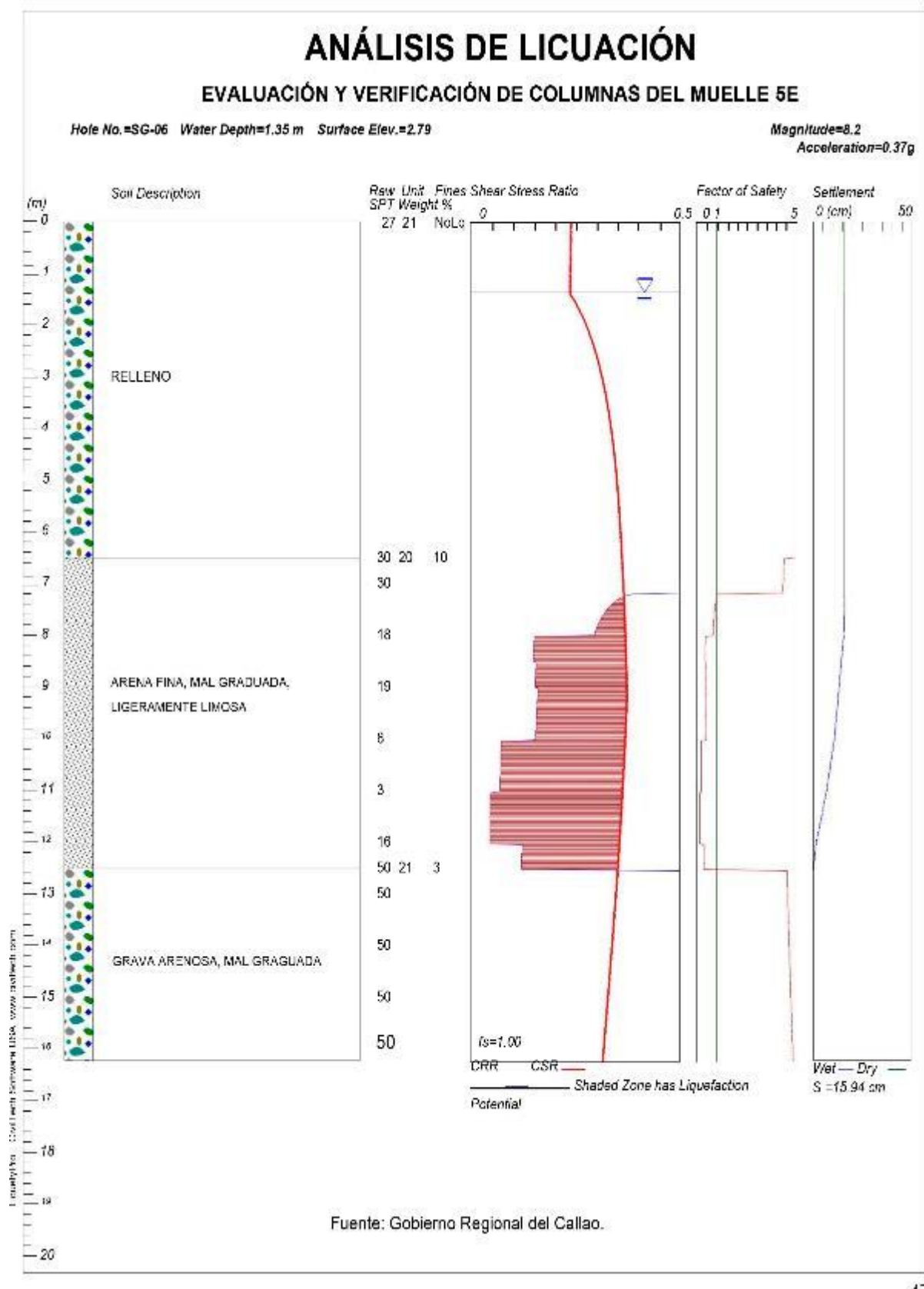
ANÁLISIS DE LICUACIÓN

EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN DE COLUMNAS DEL MUELLE 5E

Hole No.=SGR5-03 Water Depth=1.6 m Surface Elev.=2.75

Magnitude=8.2
Acceleration=0.37g



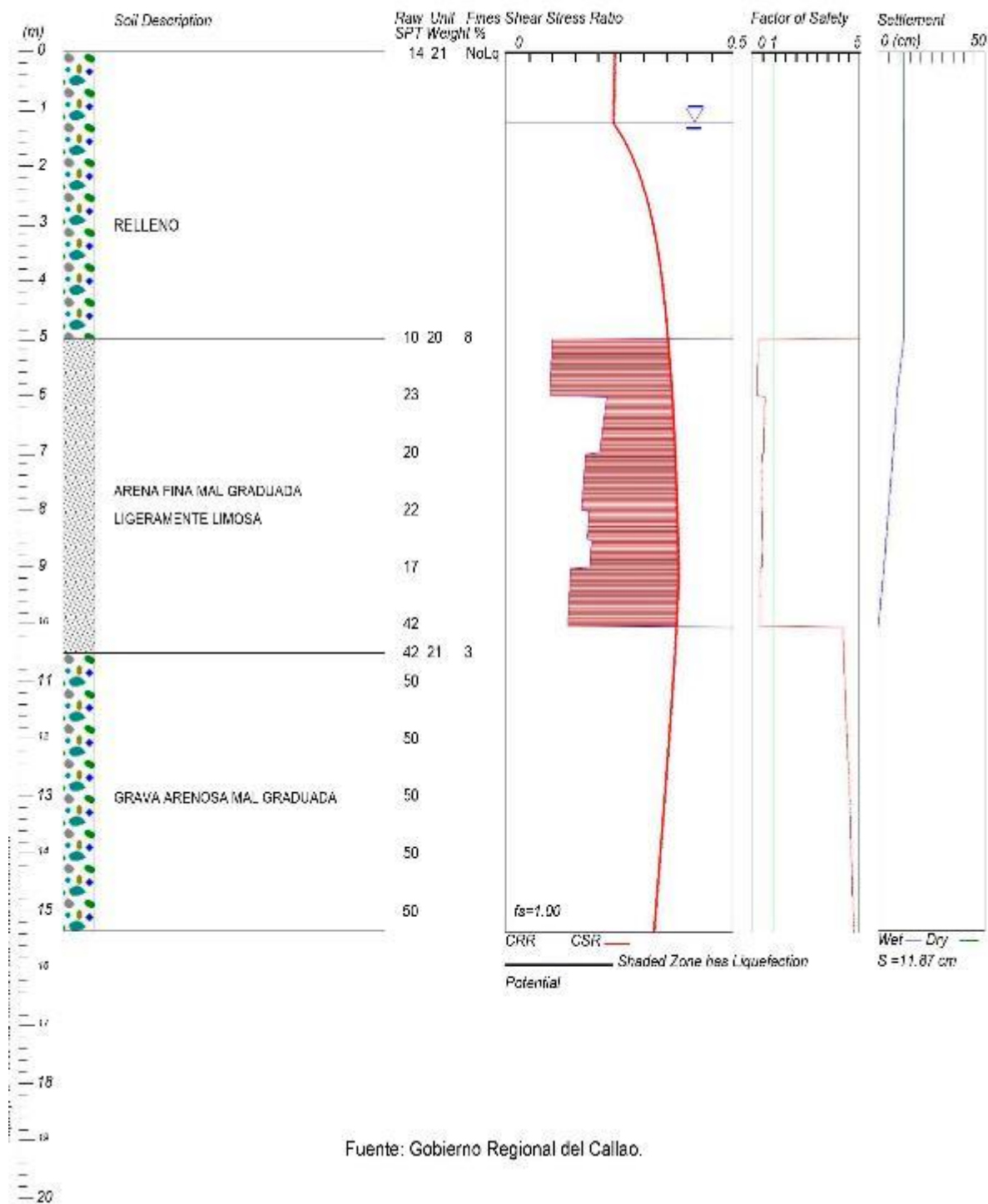


ANÁLISIS DE LICUACIÓN

EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN DE COLUMNAS DEL MUELLE 5E

Hole No.=SGR5-04 Water Depth=1.2 m Surface Elev.=2.79

Magnitude=8.2
Acceleration=0.37g



**ANEXO J: ESTABILIZACIÓN DE ESTRATOS DE ARENA POTENCIALMENTE
LICUABLE**

ESTABILIZACIÓN DE DEPÓSITOS DE ARENA POTENCIALMENTE LICUABLES USANDO DRENES DE GRAVA

(Seed & Boulton, 1977)

ESTUDIO: EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN COLUMNAS EN MUELLE 5F, UBICADO EN EL CALLAO

SOLICITA: CONSORCIO FCC - JIC

N(spt)	M	N _{eq}	N _i	N _{eq} /N _i	u
15	8.35	26	9	3	0.3

kh	γ _w	E	mv	rg	td	Tad
m/s	kN/m ³	Mpa	m ² /kN		seg	
1.00E-05	9.80	14857	5.00E-05	0.4	75	9.57

a	a/b	b
m		m
0.4	0.389	1.03

Resultados:

D = 0.80 m
E = 1.75 m

- a: Radio del dren de grava.
b: Radio del Área drenate.
n: Diámetro del dren de grava.
t: Espaciamiento entre ejes de cada dren de grava.

M: Magnitud momento del Sismo

N_{eq}: Número de ciclos de carga equivalente durante un terremoto.

N_i: Número de ciclos necesarios para que inicie la licuación.

u: Relación de Poisson

kh: Permeabilidad horizontal del estrato potencialmente licuable.

γ_w: Peso Específico del agua.

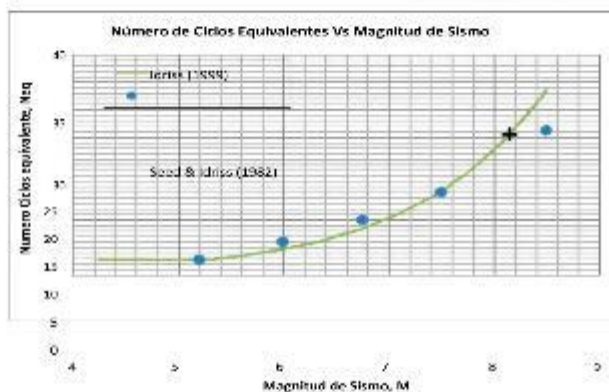
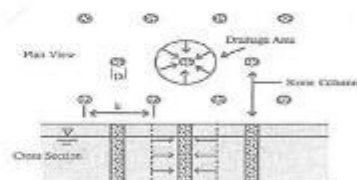
E: Módulo de Elasticidad.

mv: Coeficiente de Compresibilidad Volumétrica.

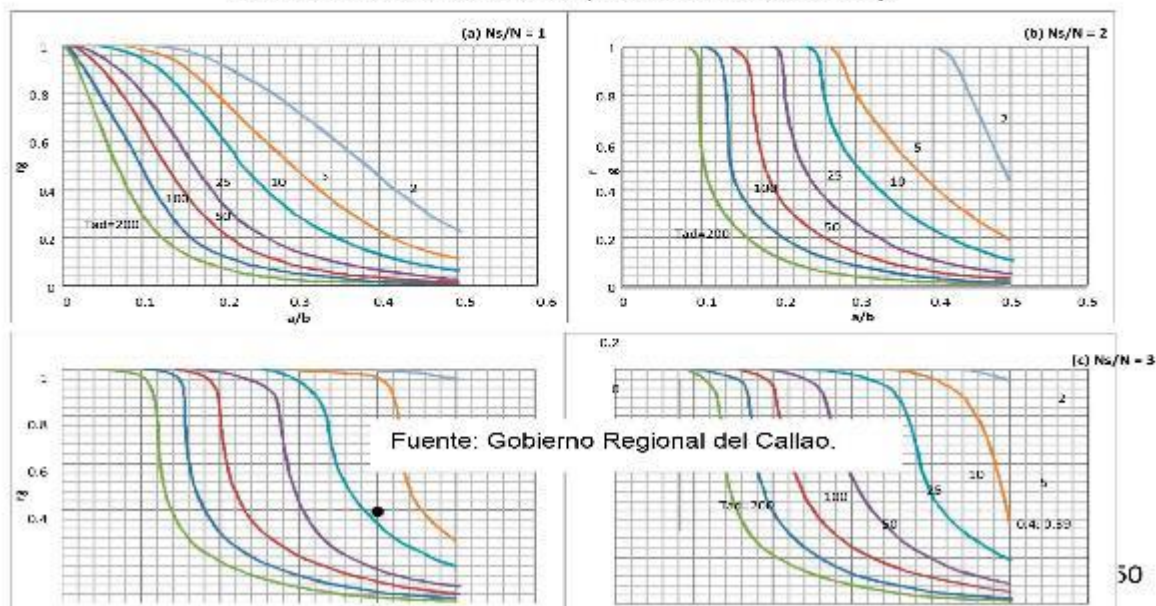
rg: Relación del Incremento de Presión de Poro.

td: Tiempo de duración del sismo de diseño.

Tad: Factor de tiempo adimensional.



Relación entre Incremento de Presión de Poro y los Parámetros del Sistema de Drenaje



ESTABILIZACIÓN DE DEPÓSITOS DE ARENA POTENCIALMENTE LICUABLES USANDO DRENES DE GRAVA

[Seed & Booker, 1977]

ESTUDIO: EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN COLUMNAS EN MUELLE 5L, UBICADO EN EL CALLAO

SOLICITA: CONSORCIO FCC - JIC

N(spt)	M	N _{eq}	N _i	N _{eq} /N _i	u
12	8.2	27	27	1	0.3

M: Magnitud momento del Sismo.

N_{eq}: Número de ciclos de carga equivalente durante un terremoto.

N_i: Número de ciclos necesarios para que inicie la licuación.

u: Relación de Poisson.

kh	γ _w	E	m _v	r _g	t _d	T _{ad}
m/s	kN/m ³	Mpa	m ² /kN	-	seg	-
1.00E-05	9.80	10800	6.88E-05	0.4	60	5.56

kh: Permeabilidad horizontal del estrato potencialmente licuable.

γ_w: Peso Específico del agua.

E: Módulo de Elasticidad.

m_v: Coeficiente de Compresibilidad Volumétrica.

r_g: Relación del Incremento de Presión de Poro.

t_d: Tiempo de duración del sismo de diseño.

T_{ad}: Factor de tiempo adimensional.

a	a/b	b
m	-	m
0.4	0.317	1.26

Resultados:

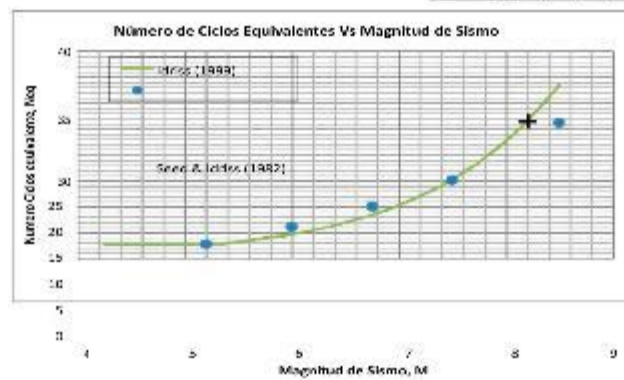
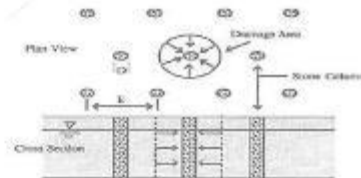
D = 0.80 m
E = 2.15 m

a: Radio del dren de grava.

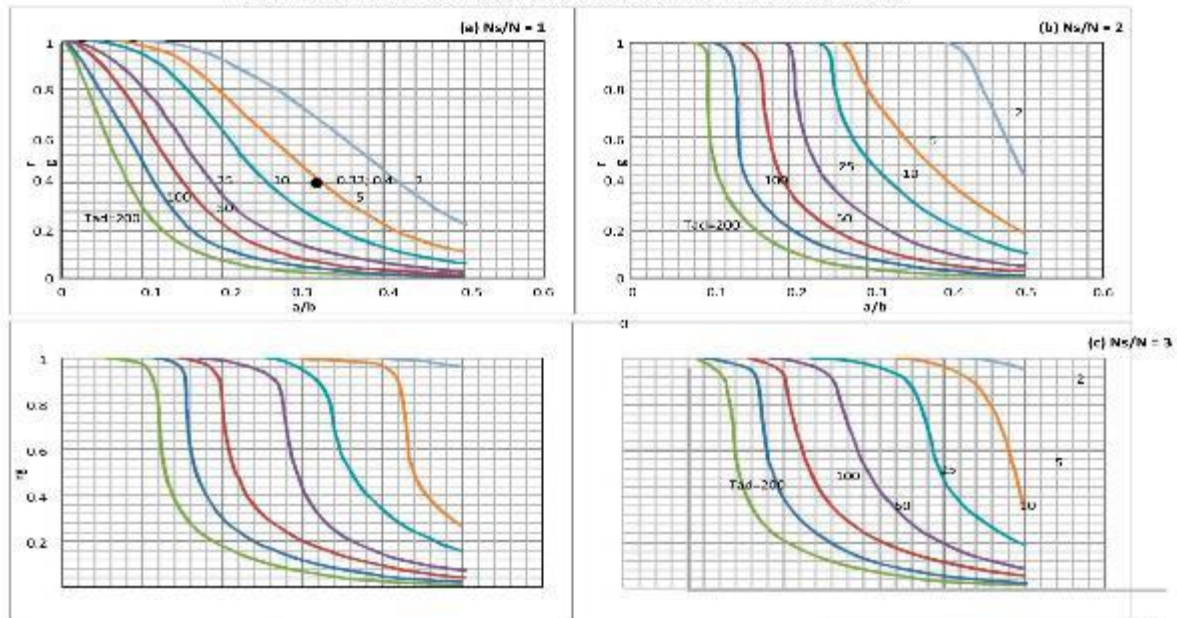
b: Radio del Área drenante.

D: Diámetro del dren de grava.

E: Espaciamiento entre ejes de cada dren de grava.



Relación entre Incremento de Presión de Poro y los Parámetros del Sistema de Drenaje



Fuente: Gobierno Regional del Callao.

ESTABILIZACIÓN DE DEPÓSITOS DE ARENA POTENCIALMENTE LICUABLES USANDO DRENES DE GRAVA

(Seed & Booker, 1977)

ESTUDIO: EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN COLUMNAS EN MUELLE SE, UBICADO EN EL CALLAO

SOLICITA: CONSORCIO FCC - JIC

N(spt)	M	N _{eq}	NI	N _{eq} /NI	u
12	8.2	27	13	2	0.3

M: Magnitud momento del Sismo.

N_{eq}: Número de ciclos de carga equivalente durante un terremoto.

NI: Número de ciclos necesarios para que inicie la licuación.

u: Relación de Poisson.

Ich	yw	E	mv	rg	td	Tad
m/s	kg/m ³	MPa	m ² /kg	seg	seg	
1.00E-05	9.80	10800	6.88E-05	0.4	60	5.56

kh: Permeabilidad horizontal del estrato potencialmente licuable.

yw: Peso Específico del agua.

E: Módulo de Elasticidad.

mv: Coeficiente de Compresibilidad Volumétrica.

rg: Relación del Incremento de Presión de Poro.

td: Tiempo de duración del sismo de diseño.

Tad: Factor de tiempo adimensional.

a	a/b	b
40		m
0.4	0.398	1.01

Resultados:

D = 0.80 m

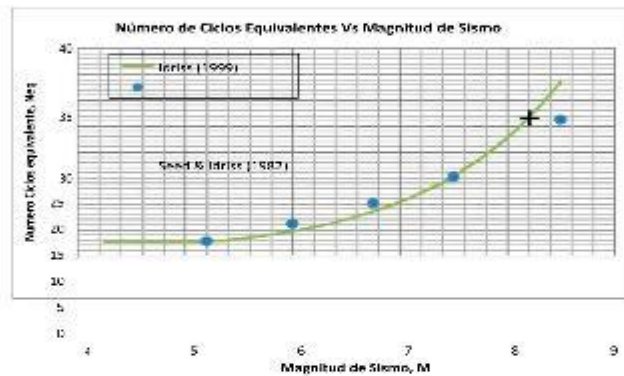
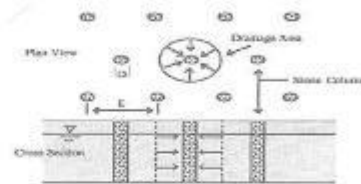
E = 1.70 m

a: Radio del dren de grava.

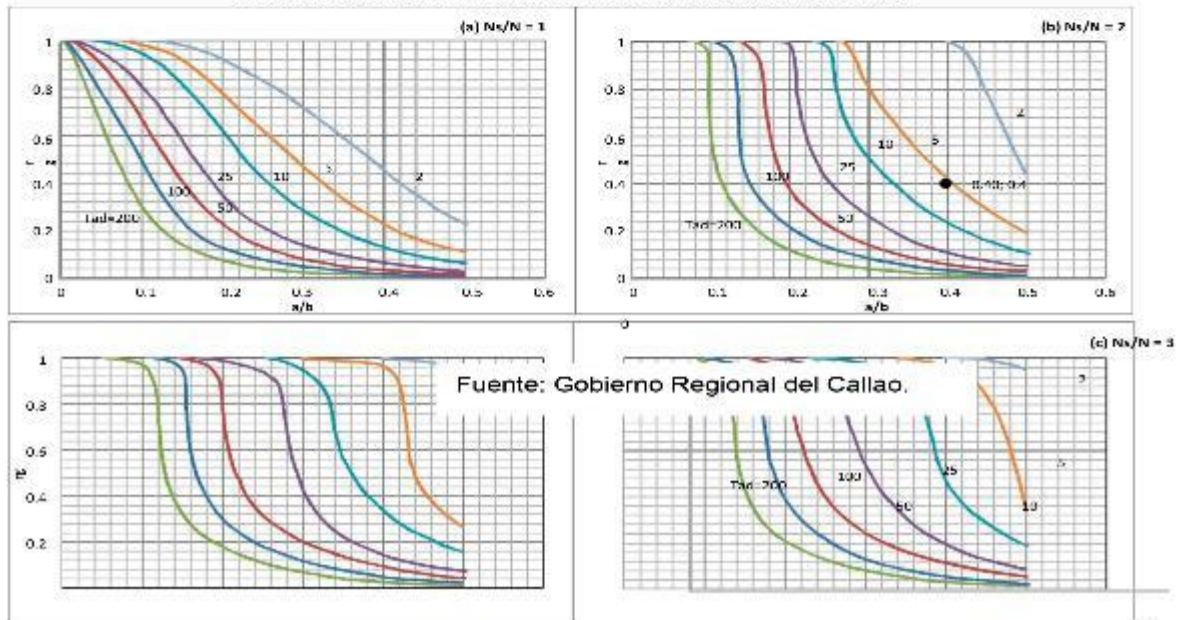
b: Radio del Área drenada.

D: Diámetro del dren de grava.

E: Espaciamiento entre ejes de cada dren de grava.



Relación entre Incremento de Presión de Poro y los Parámetros del Sistema de Drenaje



ESTABILIZACIÓN DE DEPÓSITOS DE ARENA POTENCIALMENTE LICUABLES USANDO DRENES DE GRAVA

(Seed & Booker, 1977)

ESTUDIO: EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN COLUMNAS EN MUELLE SE, UBICADO EN EL CALLAO

SOLICITA: CONSORCIO FCC - IIC

N(spt)	M	N _{eq}	N _i	N _{eq} /N _i	u
12	8.2	27	9	3	0.3

M: Magnitud momento del Sismo.

N_{eq}: Número de ciclos de carga equivalente durante un terremoto.

N_i: Número de ciclos necesarios para que inicie la licuación.

u: Relación de Poisson

kh	γ _w	E	mv	rg	td	T _{ad}
m/s	kN/m ³	Mpa	mZ/kN	seg		
1.00E-05	9.80	10800	6.88E-05	0.4	60	5.56

kh: Permeabilidad horizontal del estrato potencialmente licuable.

γ_w: Peso Específico del agua.

E: Módulo de Elasticidad.

mv: Coeficiente de Compresibilidad Volumétrica.

rg: Relación del Incremento de Presión de Poro.

td: Tiempo de duración del sismo de diseño.

T_{ad}: Factor de tiempo adimensional.

a	a/b	b
m		m
0.4	0.448	0.89

Resultados:

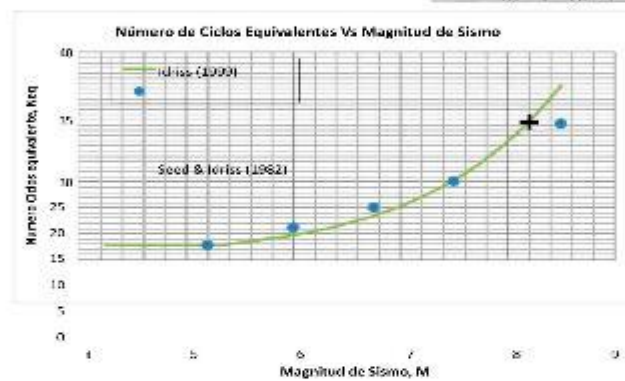
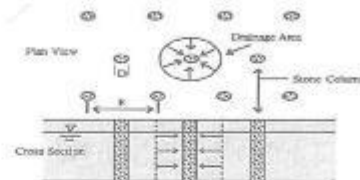
D = 0.80 m
E = 1.55 m

a: Radio del dren de grava.

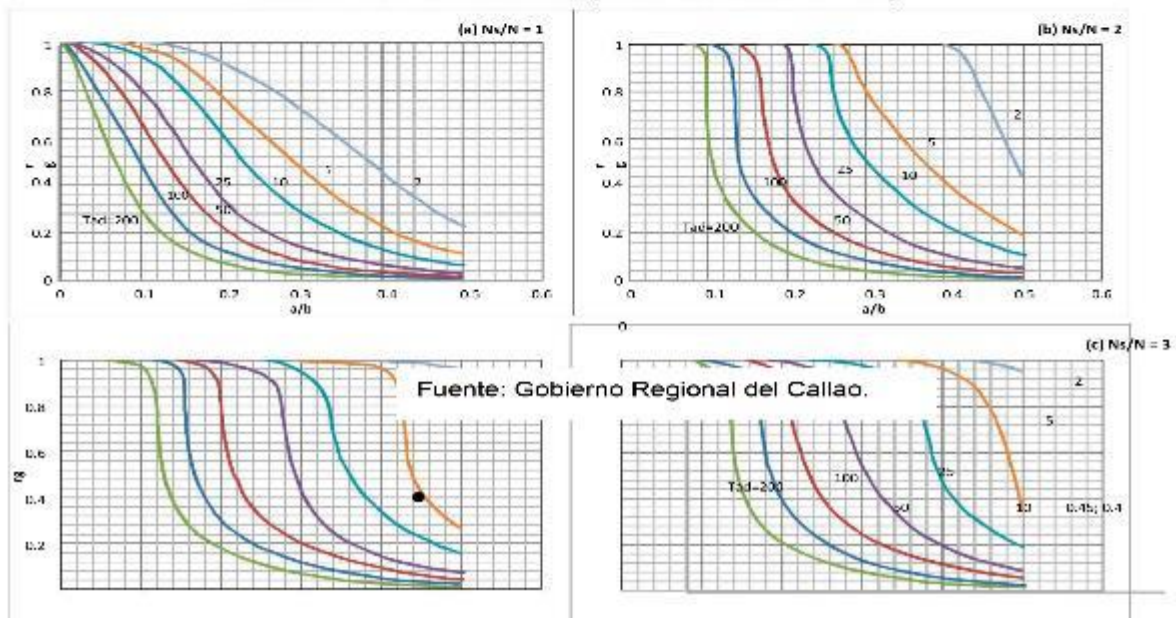
b: Radio del Área drenate.

D: Diámetro del dren de grava.

E: Espaciamiento entre ejes de cada dren de grava.



Relación entre Incremento de Presión de Poro y los Parámetros del Sistema de Drenaje



ESTABILIZACIÓN DE DEPÓSITOS DE ARENA POTENCIALMENTE LICUABLES USANDO DRENES DE GRAVA

(Seed & Booker, 1977)

ESTUDIO: EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN COLUMNAS EN MUELL DE, UBICADO EN EL CALLAO

SOLICITA: CONSORCIO FCC - JJC

N(spt)	M	Neg	NI	Neg/NI	u
12	8.2	27	7	4	0.3

M: Magnitud momento del Sismo.

Neg: Número de ciclos de carga equivalente durante un terremoto.

NI: Número de ciclos necesarios para que inicie la licuación.

u: Relación de Poisson.

kh	γw	E	mv	rg	td	Tad
m/s	kN/m ³	Mpa	m ² /ch	seg		
1.00E-05	9.80	10800	6.88E-05	0.4	60	5.56

kh: Permeabilidad horizontal del estrato potencialmente licuable.

γw: Peso Específico del agua.

E: Módulo de Elasticidad.

mv: Coeficiente de Compresibilidad Volumétrica.

rg: Relación del Incremento de Presión de Poro.

td: Tiempo de duración del sismo de diseño.

Tad: Factor de tiempo adimensional.

a	a/b	b
m		m
0.4	0.487	0.82

Resultados:

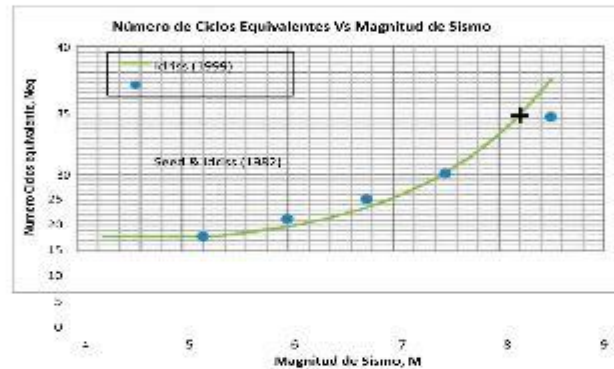
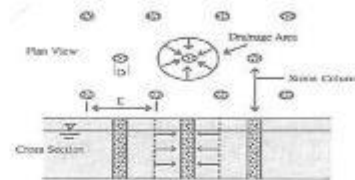
D =	0.80	m
E =	1.40	m

a: Radio del dren de grava.

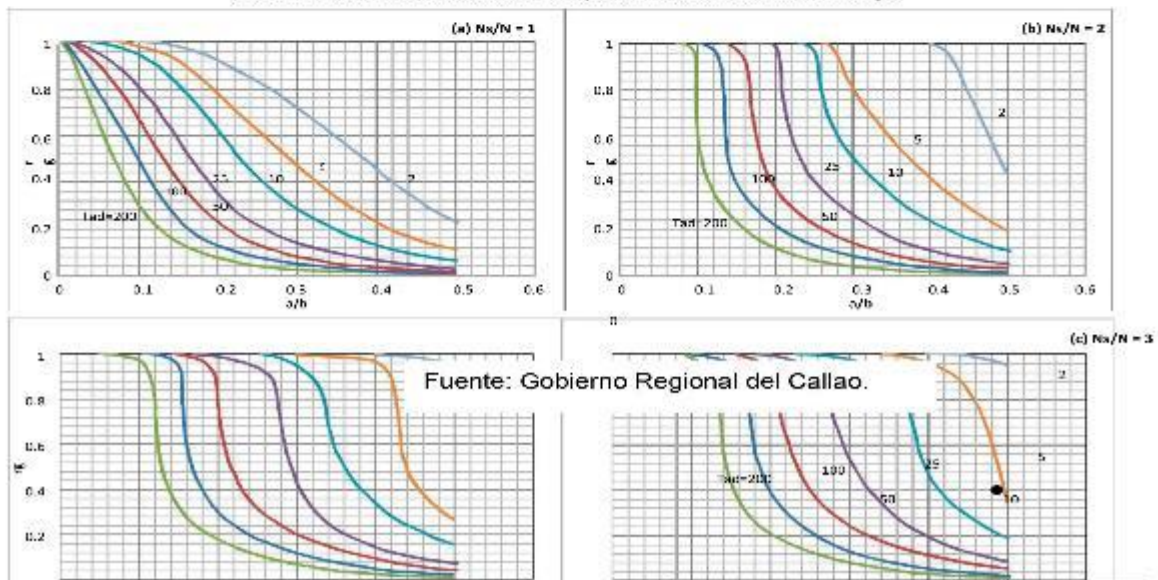
b: Radio del Área drenate.

D: Diámetro del dren de grava.

E: Espaciamiento entre ejes de cada dren de grava.



Relación entre Incremento de Presión de Poro y los Parámetros del Sistema de Drenaje



ANEXO K: DISEÑO DE COLUMNAS DE GRAVA

Con diámetro = 0.50

ESTABILIZACIÓN DE DEPÓSITOS DE ARENA POTENCIALMENTE LICUABLES USANDO DRENES DE GRAVA

(Seed & Booker, 1977)

ESTUDIO: EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN COLUMNS EN MUJERES, UBICADO EN EL CALLAO

SOLICITA: CONSORCIO FCC - JJC

N(spt)	M	N _{eq}	NI	N _{eq} /NI	u
12	8.2	27	27	1	0.3

M: Magnitud momento del Sismo.

N_{eq}: Número de ciclos de carga equivalente durante un terremoto.

NI: Número de ciclos necesarios para que inicie la licuación.

u: Relación de Poisson.

kh	γ _w	E	mv	rg	td	Tad
m/s	kn/m ³	Mpa	m ² /kN		seg	
1.00E-05	9.80	10800	6.88E-05	0.4	60	14.24

kh: Permeabilidad horizontal del estrato potencialmente licuable.

γ_w: Peso Específico del agua.

E: Módulo de Elasticidad.

mv: Coeficiente de Compresibilidad Volumétrica.

rg: Relación del Incremento de Presión de Poro.

td: Tiempo de duración del sismo de diseño.

Tad: Factor de tiempo adimensional.

a	a/b	b
m		m
0.25	0.238	1.05

Resultados:

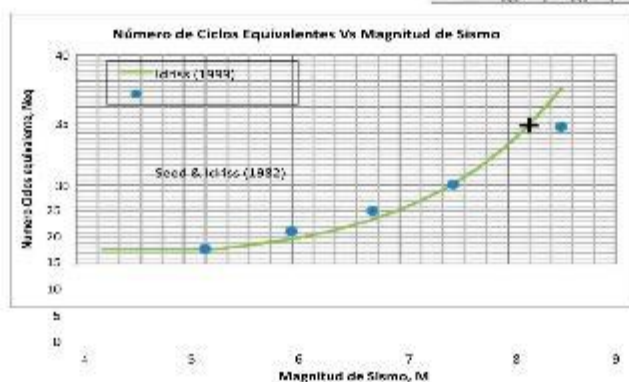
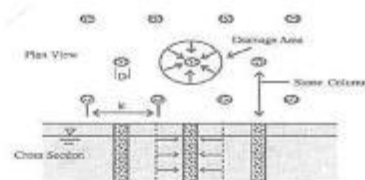
D = 0.50 m
E = 1.80 m

a: Radio del dren de grava.

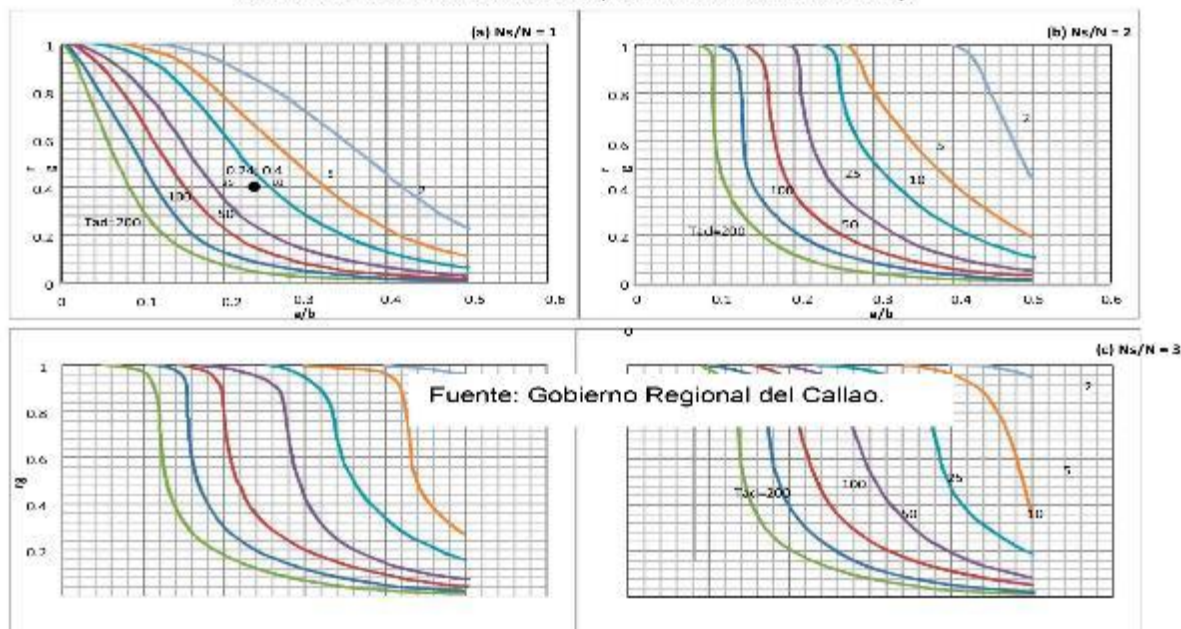
b: Radio del Área drenante.

D: Diámetro del dren de grava.

E: Espaciamiento entre ejes de cada dren de grava.



Relación entre Incremento de Presión de Poro y los Parámetros del Sistema de Drenaje



ESTABILIZACIÓN DE DEPÓSITOS DE ARENA POTENCIALMENTE LICUABLES USANDO DRENES DE GRAVA

(Seed & Booker, 1977)

ESTUDIO: EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN COLUMNAS EN MUELLE 5L, UBICADO EN EL CALLAO

SOLICITA: CONSORCIO FCC - JIC

N(spt)	M	N _{eq}	N _i	N _{eq} /N _i	u
12	8.2	27	13	2	0.3

M: Magnitud momento del Sismo.

N_{eq}: Número de ciclos de carga equivalente durante un terremoto.

N_i: Número de ciclos necesarios para que inicia la licuación.

u: Relación de Poisson.

kh	γ _w	E	mv	rg	td	T _{ad}
m/s	kN/m ³	MPa	m ² /kN		seg	
1.00E-05	9.80	10800	6.88E-05	0.4	60	14.24

kh: Permeabilidad horizontal del estrato potencialmente licuable.

γ_w: Peso Específico del agua.

E: Módulo de Elasticidad.

mv: Coeficiente de Compresibilidad Volumétrica.

rg: Relación del Incremento de Presión de Poro.

td: Tiempo de duración del sismo de diseño.

T_{ad}: Factor de tiempo adimensional.

a	a/b	b
m		m
0.25	0.309	0.81

Resultados:

D = 0.50 m

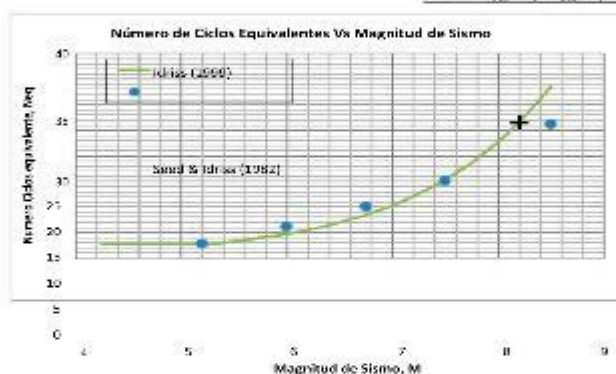
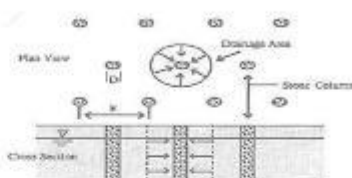
E = 1.40 m

a: Radio del dren de grava.

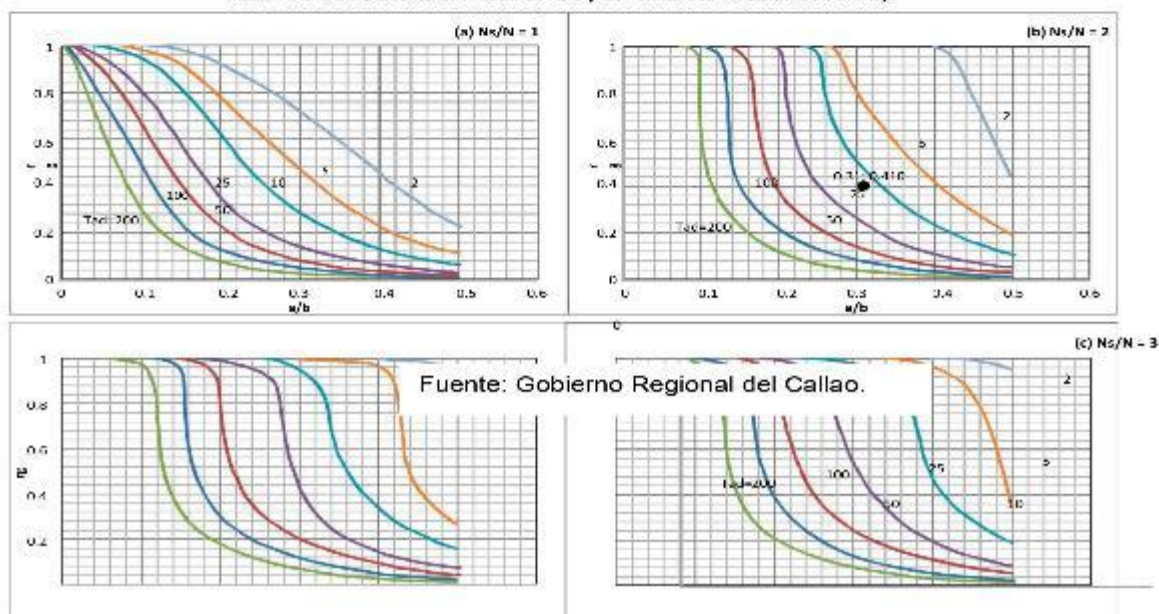
b: Radio del Área drenada.

D: Diámetro del dren de grava.

E: Espaciamiento entre ejes de cada dren de grava.



Relación entre Incremento de Presión de Poro y los Parámetros del Sistema de Drenaje



ESTABILIZACIÓN DE DEPÓSITOS DE ARENA POTENCIALMENTE LICUABLES USANDO DRENES DE GRAVA

(Seed & Booker, 1977)

ESTUDIO: EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN COLUMNAS EN MUELLE 5E, UBICADO EN EL CALLAO
SOLICITA: CONSORCIO FCC - JIC

N[spt]	M	N _{eq}	N _i	N _{eq} /N _i	u
12	8.2	27	9	3	0.3

M: Magnitud momento del Sismo.

N_{eq}: Número de ciclos de carga equivalente durante un terremoto.

N_i: Número de ciclos necesarios para que inicie la licuación.

u: Relación de Poisson

kh	γ _w	E	mv	rg	td	Tad
m/s	kN/m ³	Mpa	m ² /kN		seg	
1.00E-05	9.80	10800	6.88E-05	0.4	60	14.24

kh: Permeabilidad horizontal del estrato potencialmente licuable.

γ_w: Peso Específico del agua.

E: Módulo de Elasticidad.

mv: Coeficiente de Compresibilidad Volumétrica.

rg: Relación del Incremento de Presión de Poros.

td: Tiempo de duración del sismo de diseño.

Tad: Factor de tiempo adimensional.

a	a/b	b
m		m
0.25	0.360	0.69

Resultados:

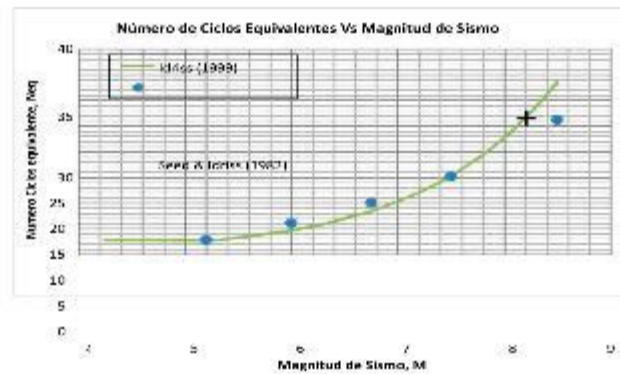
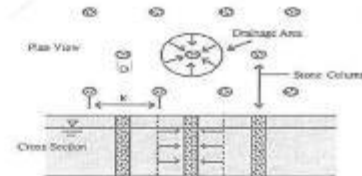
D = 0.50 m
E = 1.20 m

a: Radio del dren de grava.

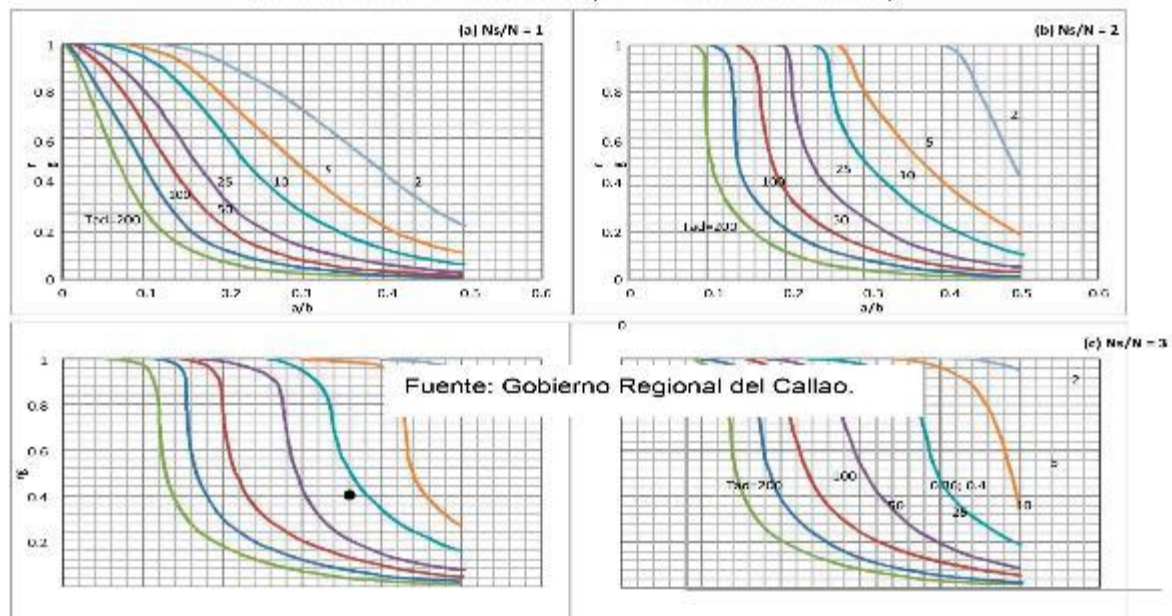
b: Radio del Área drenada.

D: Diámetro del dren de grava.

t: Espaciamiento entre ejes de cada dren de grava.



Relación entre Incremento de Presión de Poros y los Parámetros del Sistema de Drenaje



ESTABILIZACIÓN DE DEPÓSITOS DE ARENA POTENCIALMENTE LICUABLES USANDO DRENES DE GRAVA

(Seed & Booker, 1977)

ESTUDIO: EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN COLUMNAS EN MUÑE F 5F, UBICADO EN EL CALLAO

SOLICITA: CONSOLIDO LOC - JUE

N(spt)	M	Neq	NI	Neq/NI	u
12	8.2	27	7	4	0.3

M: Magnitud momento del Sismo.

Neq: Número de ciclos de carga equivalente durante un terremoto.

NI: Número de ciclos necesarios para que inicie la licuación.

u: Relación de Poisson.

kh	γw	E	mv	rg	td	Tad
m/s	kN/m ³	Mpa	m ² /kN		seg	
1.00E-05	9.80	10800	6.88E-05	0.4	60	14.24

kh: Permeabilidad horizontal del estrato potencialmente licuable.

γw: Peso Específico del agua.

E: Módulo de Elasticidad.

mv: Coeficiente de Compresibilidad Volumétrica.

rg: Relación del Incremento de Presión de Poro.

td: Tiempo de duración del sismo de diseño.

Tad: Factor de tiempo adimensional.

a	a/b	b
m		m
0.25	0.389	0.64

Resultados:

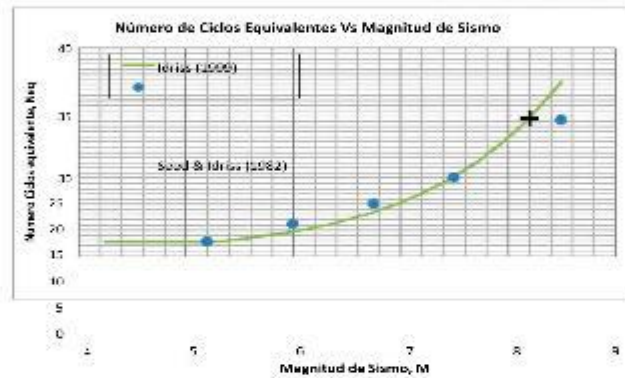
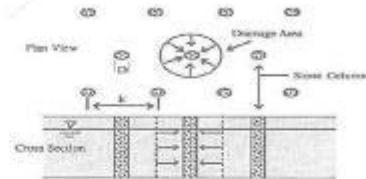
D =	0.50 m
E =	1.10 m

a: Radio del dren de grava.

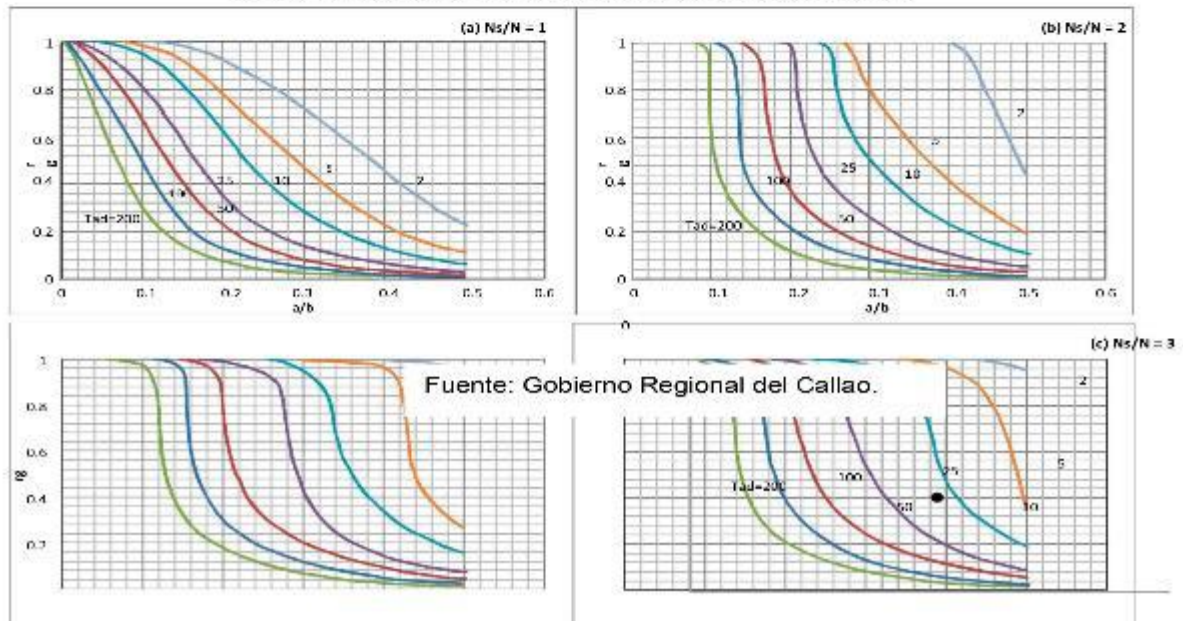
b: Radio del Área drenante.

D: Diámetro del dren de grava.

E: Espaciamiento entre ejes de cada dren de grava.



Relación entre Incremento de Presión de Poro y los Parámetros del Sistema de Drenaje



ANEXO L: EQUIPOS



Alonso de Córdova 5151, Of. 1401
Las Condes Santiago - CHILE.
Teléfono: (56-2) 437 2900,
Fax: (56-2) 212 72 35
Web: www.terratest.cl



BAUER BG 24H #817

Perforadora hidráulica marca Bauer de origen Alemán, modelo BG 24H montada sobre carro de orugas. Permite perforar hasta un diámetro 1700 mm sin encamisar y un diámetro máximo entubado de 1400 mm. (montando adaptador especial llega a 1.500 mm)

Máquina Base	Sennebogen BS 20 C
No. Serie Máquina Base	B570.6.823
Año de Fabricación	2005
Especificaciones Técnicas del equipo	
Altura del mástil	21.84 m
Peso operativo aproximado	77.5 Ton
Profundidad máxima de perforación	57.8 m
Motor máquina base	CAT C9 # CLJ 07766
Potencia motor	350 HP (261 kW) @ 1.850 RPM
Cabeza de rotación	KDK 232S # 474
Torque máximo teórico	229 kNm
Velocidad máxima del KDK	27 rpm / 59 rpm
Capacidad del winche principal	200 kN
Diámetro cable principal	Izaflex 28 mm con ojo de 60 mm
Longitud máxima cable principal	76 m
Velocidad máxima del winche ppal.	80 m/min
Caída libre controlada	Si
Capacidad winche auxiliar	80 kN
Diámetro cable auxiliar	Izaflex 20 mm con ojo de 40 mm
Longitud cable auxiliar	50 m
Velocidad máxima del winche auxiliar	70 m/min
Caída libre	No
Sistema de empuje:	Winche
Capacidad del sistema de empuje	270 kN push / 280 kN pull
Carrera del sistema de empuje	9,20 m (kelly) / 15,46 m (CFA)
Cables de winche pull down	2 Angula 6x36: 24 mm x 62 mts. (superior) & 24mm x 61 mts. (inferior)
Máximo diámetro perforación sin encamisar	1700 mm
Máximo diámetro perforación encamisada	1400 mm *
Conexión mecánica e hidráulica para osciladora	Si
Conexión para CFA (B-Tronic)	Si
Kelly	BK25/394/4/40
Base extensible (reducción de ancho)	Si

(*) Con adaptador especial puede encamisar 1.500 mm.



PILOTES TERRATEST - FUNDACIONES ESPECIALES

BAUER BG24H #817

F-SGC-6-05.02 REV/1



**PILOTES
TERRATEST**

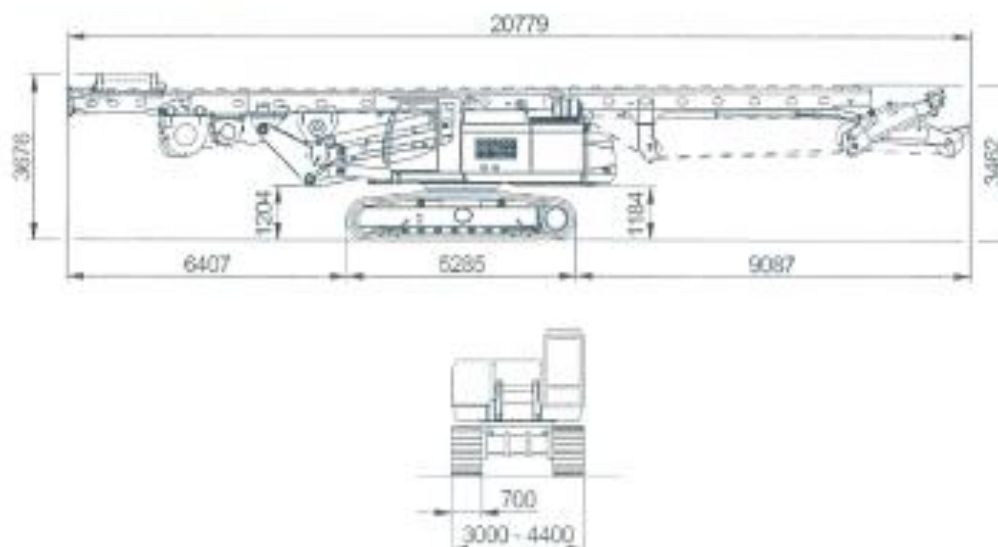
Alonso de Córdova 5151, Of. 1401
Las Condes Santiago - CHILE
Teléfono: (56-2) 437 2900,
Fax: (56-2) 212 72 35
Web: www.terratest.cl



Datos para el Transporte:

Largo	20.78 mts.
Ancho	3.00 mts.
Altura	3.68 mts.
Peso standard	67,5 Ton

Dimensiones en [mm]



PILOTES TERRATEST - FUNDACIONES ESPECIALES

BAUER BG24H #817

F-SGC-8-05.02 REV/1

Fuente: PILOTES TERRATEST.

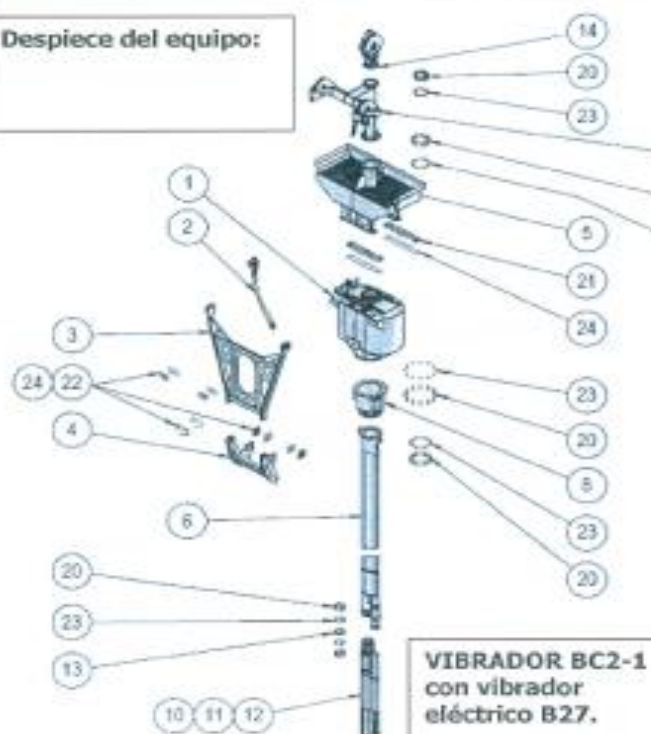


**PILOTES
TERRATEST**

Alonso de Córdova 5151, Of. 1401
Las Condes Santiago – CHILE.
Teléfono: (56-2) 437 2900,
Fax: (56-2) 212 72 98
Web: www.terratest.cl



Despiece del equipo:



PILOTES TERRATEST – FUNDACIONES ESPECIALES

VIBRADOR BC2-1

F-SGC-8-05.02 REV/1

Fuente: PILOTES TERRATEST.



**PILOTES
TERRATEST**

Alonso de Córdova 5151, Of. 1401
Las Condes Santiago – CHILE.
Teléfono: (56-2) 437 2900,
Fax: (56-2) 212 72 35
Web: www.terratest.cl



VIBRADOR BETTERGROUND BC2

El equipo Vibrador BC2 se emplea para la ejecución de columnas de grava de diámetros variables entre 50 y 150 cm y largos de hasta 20 metros, de acuerdo a la configuración indicada en esta ficha. El equipo se debe emplear en conjunto con una grúa de izaje, un generador y un compresor.

Vibrador	
Marca y modelo	BETTERGROUND BC2-1
No. Serie Máquina	#330
Año de Fabricación	2012
Largo total equipo armado completo	27,50 mts
Peso	12,5 tons.
Max fuerza excéntrica	270 kN
Velocidad de rotación	1800 rpm (60 Hz)
Amplitud máxima	24 mm
Potencia eléctrica B27	130 KW

PESOS DEL EQUIPO :

Pos	Descripción	Peso (kg)
1	Tank complete (tanque)	2.230
2	Cable connection complete	33
3	Upper sliding frame complete	512
4	Lower sliding frame complete	310
5	Hopper complete (tolva)	1.664
6	Silo unit 16.24 mts. (sin Grava)	3.050
7	Rope guide	900
8	Silo closing gate (compuerta)	940
11	Vibrofloat B27	2.300
12	Lifting head twofold (polea sup.)	500
	Peso Total (Kgs)	12.439



PILOTES TERRATEST – FUNDACIONES ESPECIALES

VIBRADOR BC2-1

F-SGC-8-05.02 REV/1

Fuente: PILOTES TERRATEST.

ANEXO M: CUADRO DE VARIABLES

Variables	Def. Conceptual	Def. Operacional	Dimensiones	Indicadores
VI: Columnas de grava	Las columnas de grava es otro método de mejora de terrenos blandos, introducir columnas de grava en los orificios creados por el vibrador o equipo de pilotaje.	Esta variable en si de columnas de grava(vibrosustitucion) el cual es aplica en su mayoría en suelos cohesivos o blandos. En la cual al tener un buen diseño de la columna de grava. Cuando se vuelva al terreno el SPT, podremos ver las mejora que tuvo el suelo.	Vibrosustitucion Rendimientos y costos	Rendimiento: 120 ml/día, aproximadamente a pesar que esto se generan por capas hasta llegar a la superficie.
				Al solo utilizar piedra, el vibrador y en ocasiones agua. No es contamina el medio ambiente.
				Al solo tener piedra, en casos agua, vibrador y poco personal. Al tener pocos insumos y poco personal, al A.P.U. Es menor con respectos a otros métodos de mejoramientos de suelos.
				Observar que las piedras estén libre de impurezas.

				Una buena opción como mejoramiento de suelos.
			Vibrosustitución Vía húmeda y suelos blandos	Alimenta, superior se coloca la grava o “top-feed”
				Agua a presión
				Vibrador.
				Terrenos cohesivos. (cuando contiene de fino > 12%)
				Aumento de capacidad portante y estabilidad. Reduce los asentamientos y la posibilidad de licuación del suelo.
				Muelle,
				presencia de nivel freático.
				aplicación de SEED&BOOKER 1976, en la cual obtenemos el diámetro de columnas de grava,

				espaciamientos entre ellas.
VD: Estabilización de talud con suelo susceptible a licuado	Es cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal y en la cual hay estructuras.		Talud indefinida: cuya desplazamiento de la superficie es en paralelo. Factor de seguridad	Situación inestable
				Tensión de corte
			Corte vertical: en suelos puramente cohesivo	Es la operación entre la fuerza estabilizadora y la fuerza desestabilizadoras Presenta condiciones de equilibrio