



**UNIVERSIDAD DE VALPARAISO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

**DEEP SOIL MIXING UNA NUEVA OPCIÓN PARA  
LAS TECNICAS CONVENCIONALES DE  
MEJORAMIENTO PROFUNDO DE SUELOS EN  
CHILE**

Por:

Ricardo Ignacio Figueroa Taiba

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en  
Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía:

Néstor Rene Espinoza Guillen

Agradecimiento Especial:

Ferrara Proyectos Especiales

Febrero, 2022

# Agradecimientos

A mis padres Ricardo y Patricia, que me han apoyado desde siempre. Además, han sido parte fundamental de mi formación, para ser la versión que soy actualmente. Estando presente en mi vida en muchos buenos momentos, los que considero son para disfrutar y también han estado en los otros momentos, de esos que debe aprender.

A mis abuelos Choche, Nena, Oscar y Yita, por el afecto entregado y preocupación por mi bienestar, es difícil ser el nieto regalón, un trabajo de tiempo completo. Agradecer también, por las enseñanzas que me han entregado durante todos estos años y por supuesto todas las veces que me he dejado consentir por ellos.

A mis hermanos Diego y Macarena, con los que viví durante varios años y debieron convivir con mi particular forma de ser, los estaba entrenando, la vida es difícil jaja.

A mis tíos Patricio, Loreto, Angelica, Luis, Manuel y Oscar que siempre han estado a para mí apoyándome y entregándome consejo cuando lo necesite, por la buena relación que tengo con cada uno de ellos y confianza que hemos cultivado desde que era pequeño. Mención especial para Oscar que me ha encaminado en el mundo de la ingeniería, a través de su consejo y experiencia.

A mis primos Joaquín, Conny, Natty, Cami, Cata, Seba y Nicolito siempre es agradable compartir con ellos buenos momentos. Además, al ser el primo mayor, todos están conscientes que me deben pleitesía.

A mis amigos que conocí jugando en la calle cuando era un niño, también a mis amigos que conocí del colegio, agradecer su amistad por tantos años, espero seguir disfrutando de buenos momentos juntos, que luego los recordemos en juntas, tal cual lo hacemos con las aventuras ya vividas.

También agradecer a mis compañeros y amigos de carrera, que durante largos años compartimos momentos de estrés y también los de distracción, a todos los que conocí en este viaje y que aportaron con recuerdos, para decorar el termino de este camino.

Al profesor Rene y a la escuela de ingeniería civil por su apoyo para concluir esta etapa universitaria.

A Ferrara por apoyarme en esta memoria de título, por facilitarme material de temas complementarios y afines con el mío, por demostrar compromiso con la investigación y siempre estar buscando innovar.

# Índice

1. Capítulo: Introducción .....	7
1.1. Motivación .....	7
1.2. Objetivos .....	10
1.2.1. General .....	10
1.2.2. Específicos .....	10
2. Capítulo: Deep Soil Mixing (DSM) .....	11
2.1. Prologo .....	11
2.2. Historia .....	11
2.3. Aplicaciones .....	11
2.3.1. Contención de Terreno .....	12
2.3.2. Mitigación de licuefacción .....	13
2.3.3. Mejora del comportamiento del suelo .....	14
2.3.4. Fundaciones profundas .....	15
2.3.5. Control de filtraciones de aguas subterráneas y pantallas impermeabilizantes (Cut-off) .....	16
2.3.6. Contención del material contaminado .....	18
2.4. Métodos de Mezcla .....	19
2.4.1. Vía Húmeda (Wet Method) .....	19
2.4.2. Vía Seca (Dry Method) .....	20
2.5. Consideraciones Constructivas .....	20
2.5.1. Características del método .....	20
2.5.2. Formación de muro continuo .....	21
2.5.3. Instalación de refuerzo .....	21
2.5.4. Procedimiento de Trabajo .....	22
2.5.5. Factores de Productividad .....	23
2.5.6. Herramientas de Perforación .....	24
2.5.7. Equipos .....	29
2.6. Tipos de Mezcla .....	30
2.6.1. Aglomerantes .....	30
2.6.2. Mezcla de agua .....	31
2.6.3. Razón Agua/Cemento .....	31
2.6.4. Inyección de Aire durante el mezclado .....	32
2.7. Control de Calidad y Garantías de Calidad (QC/QA) .....	32
2.7.1. Criterios de Aceptación del Producto .....	32
2.7.2. Pruebas Antes del Proceso Constructivo .....	33
2.7.3. Control de Calidad .....	34
2.7.4. Garantías de Calidad .....	35

2.8.	Diseño Deep Soil Mixing .....	36
2.8.1.	Razón de área remplazada ( $A_r$ ) .....	38
2.8.2.	Coeficiente de Reducción del esfuerzo Cortante ( $r_d$ ).....	38
2.8.3.	Factor de Corte Efectivo ( $C_G$ ).....	40
2.8.4.	Distorsión Relativa / Relación de Deformación por Corte ( $\gamma_r$ ).....	41
2.9.	Columnas de Grava .....	42
2.9.1.	Prologo .....	42
2.9.2.	Clasificación .....	43
2.9.3.	Avances sobre el Método de Columnas de Grava.....	46
2.10.	Evaluación del potencial de Licuación en Suelos .....	50
2.10.1.	Factores de susceptibilidad de licuación.....	50
2.10.2.	Evaluación del Potencial de licuación .....	51
2.10.3.	Parámetros de Vulnerabilidad de licuación .....	61
3.	Caso de Estudio.....	64
3.1.	Introducción .....	64
3.2.	Parámetros del Suelo.....	64
3.2.1.	Estratigrafía. ....	65
3.2.2.	Ensayos CPT.....	68
3.2.3.	Parámetros de Diseño. ....	69
	Susceptibilidad de Suelos.....	69
3.3.	Columnas de Grava.....	73
3.3.1.	Introducción.....	73
3.3.2.	Factor de Seguridad.....	74
3.3.3.	Parámetros de Vulnerabilidad .....	76
3.4.	The Deep Soil Mixing .....	80
3.4.1.	Introducción .....	80
3.4.2.	Opciones de diseño DSM.....	81
3.4.3.	Costos Asociados .....	85
3.4.4.	Factor de Seguridad.....	89
3.4.5.	Parámetros de Vulnerabilidad.....	91
3.5.	Comparaciones y Comentarios sobre Resultados Obtenidos .....	96
4.	Conclusiones.....	103
5.	Bibliografía .....	104
6.	Anexo .....	107
A.	Parámetros de Diseño Columnas de Grava. ....	107
B.	Parámetros de Diseño DSM.....	110
C.	Otras opciones de diseño, método Deep Soil Mixing .....	113
D.	Informe Mecánica de Suelos – 5 oriente.....	115

# Índice de Ilustraciones

<i>Ilustración 1.1 - Disposiciones de las columnas de suelo mejorado mediante DSM [1]</i> .....	7
<i>Ilustración 1.2 - Proceso de mezclado profundo por vía húmeda [2]</i> .....	7
<i>Ilustración 1.3 - Proceso de mezclado profundo por la vía seca [2]</i> .....	8
<i>Ilustración 1.4 - Perforadora modelo BG28-H perteneciente a Ferrara Proyecto Especiales</i> .....	9
<i>Ilustración 2.1 - Ejemplo de aplicación con un sistema de barrera impermeable [8]</i> .....	12
<i>Ilustración 2.2 - Ejemplos de sistemas de soil mixing para mitigar licuefacción [7]</i> .....	14
<i>Ilustración 2.3 - Ejemplo de aplicación sobre mejoramiento de suelos por SM [7]</i> .....	15
<i>Ilustración 2.4 - Ejemplo para sistemas de fundaciones profundas [7]</i> .....	16
<i>Ilustración 2.5 - Cut-off wall con columnas DSM ejecutadas de forma secante [11]</i> .....	17
<i>Ilustración 2.6 - Ejemplo de aplicación para controlar aguas subterráneas [7]</i> .....	17
<i>Ilustración 2.7 - Algunos ejemplos de DSM para muros impermeables. a) barrera impermeable en embalse b) núcleo de arcilla c) dique con superestructura instalada encima d) protección de infiltraciones. [8]</i> .....	18
<i>Ilustración 2.8 - Ejemplo de aplicación de barrera en un sistema contaminado [8]</i> .....	19
<i>Ilustración 2.9 - Representación de columnas secantes [13]</i> .....	21
<i>Ilustración 2.10 - Refuerzos en columnas de soil mixing [12]</i> .....	22
<i>Ilustración 2.11 - pre-zanja en la fase inicial del procedimiento [12]</i> .....	22
<i>Ilustración 2.12 - Visualización de las etapas para ejecutar un CM [14]</i> .....	23
<i>Ilustración 2.13 - Herramienta de perforación enumerada en sus 3 secciones [13]</i> .....	25
<i>Ilustración 2.14 - Descripción en detalle de las piezas que realizan el soil mixing mediante el SCM [13]</i> .....	26
<i>Ilustración 2.15 - Sistema de perforación SCM [13]</i> .....	27
<i>Ilustración 2.16 - Herramienta de perforación para SCM-DH [13]</i> .....	28
<i>Ilustración 2.17 - Sistema de perforación SCM-DH [13]</i> .....	28
<i>Ilustración 2.18 - Representación de los equipos, fuente: <a href="https://incotecperu.pe/obras">https://incotecperu.pe/obras</a></i> .....	29
<i>Ilustración 2.19 - Equipos en obra para ejecutar método SCM, fuente: <a href="https://incotecperu.pe/obras">https://incotecperu.pe/obras</a></i> .....	30
<i>Ilustración 2.20 - Esquema sobre el soil mixng utilizando cemento</i> .....	31
<i>Ilustración 2.21 - Sistema de Paneles de SM, unido mediante columnas secantes.[17]</i> .....	37
<i>Ilustración 2.22 - Paneles dimensionados según su <math>A_r</math> [17]</i> .....	38
<i>Ilustración 2.23 - Factor de reducción de corte versus área de reemplazo, para 3 casos de módulos de corte. [17]</i> .....	40
<i>Ilustración 2.24 - factor de corte efectivo versus área mejorada. [17]</i> .....	41
<i>Ilustración 2.25 - Distorsión relativa versus área de reemplazo, para casos de estudio <math>G_r = 13.5, 20</math> y <math>50</math>. ....</i>	42
<i>Ilustración 2.26 - representación etapas de vibrosustitución.[19]</i> .....	44
<i>Ilustración 2.27 - Etapas de instalación, columnas de grava compactada. [19]</i> .....	45
<i>Ilustración 2.28 - Columnas de grava compactada, sistema RAP. [19]</i> .....	45
<i>Ilustración 2.29 - Mechas drenantes aplicadas en sistemas de columnas de grava</i> .....	46
<i>Ilustración 2.30 - Variación inicial y final de valores de resistencia en punta, obtenidas por ensayos CPT.[31]</i> .....	47
<i>Ilustración 2.31 - Teoría de la compatibilidad de deformaciones a corte para calcular la reducción de CSR.[18]</i> .....	48
<i>Ilustración 2.32 - Reducción de CSR mediante distintos para columnas de grava. [31]</i> .....	48
<i>Ilustración 2.33 - Comportamiento del módulo de corte según el área mejorada y la razón del módulo de corte. [19]</i> .....	50
<i>Ilustración 2.34 - coeficiente de reducción de tensiones (<math>r_a</math>). [24]</i> .....	53
<i>Ilustración 2.35 - Coeficiente reductor de tensiones según la magnitud del sismo y la profundidad del suelo. [25]</i> .....	54
<i>Ilustración 2.36 - Detalle grafico del sistema CPT. [25]</i> .....	56
<i>Ilustración 2.37 - Factor de corrección para la presión de confinamiento <math>K_\sigma</math>. [23]</i> .....	58

<i>Ilustración 3.1 - Ubicación de la obra [Fuente: Google Earth] .....</i>	<i>64</i>
<i>Ilustración 3.2 - Ubicación aproximada de los sondajes [35] .....</i>	<i>65</i>
<i>Ilustración 3.3 - Ubicación ensayos CPT, realizados en la obra [35].....</i>	<i>68</i>
<i>Ilustración 3.4 - Cuadro resumen sobre la clasificación de susceptibilidad según el I<sub>c</sub>. [21] .....</i>	<i>69</i>
<i>Ilustración 3.5 - Análisis de Susceptibilidad para <b>CPT1</b>, de acuerdo con los métodos propuestos por Y&amp;I [24] y B&amp;I [25].....</i>	<i>70</i>
<i>Ilustración 3.6 - Análisis de Susceptibilidad para <b>CPT2</b>, de acuerdo con los métodos propuestos por Y&amp;I [24] y B&amp;I [25].....</i>	<i>71</i>
<i>Ilustración 3.7 - Distribución en la superficie, para las columnas de grava [19] .....</i>	<i>73</i>
<i>Ilustración 3.8 - Resultados de CPT1 y CPT2, mediante métodos de Youd &amp; Idriss [24] y Boulanger &amp; Idriss [25].....</i>	<i>75</i>
<i>Ilustración 3.9 - Resultados de Índice de potencial de licuefacción, ensayos CPT para columnas de gravas ....</i>	<i>76</i>
<i>Ilustración 3.10 - Resultados de Índice de potencial de licuefacción con corrección, ensayos CPT para columnas de gravas .....</i>	<i>77</i>
<i>Ilustración 3.11 - Resultados del asentamiento generado en ensayos CPT, para columnas de gravas.....</i>	<i>78</i>
<i>Ilustración 3.12 - Resultados del número de severidad de licuación, en ensayos CPT para columnas de gravas. ....</i>	<i>79</i>
<i>Ilustración 3.13 - Distribución tipo panel del modelo DSM para el caso de estudio. [17] .....</i>	<i>80</i>
<i>Ilustración 3.14 - Sistema de grillas elaboradas con columnas simples traslapadas.[17].....</i>	<i>81</i>
<i>Ilustración 3.15 - columnas secantes. Caso A de diseño, con medidas respectivas.....</i>	<i>82</i>
<i>Ilustración 3.16 - Modelo de diseño A, representar el sistema de paneles .....</i>	<i>83</i>
<i>Ilustración 3.17 . Casos CPT1 Y CPT2, comportamiento del F.S. en los estratos de análisis .....</i>	<i>90</i>
<i>Ilustración 3.18 - CPT1 Y CPT2, parámetros de vulnerabilidad LPI.....</i>	<i>92</i>
<i>Ilustración 3.19 - CPT1 Y CPT2, parámetros de vulnerabilidad LPI corregido por Ishihara.....</i>	<i>93</i>
<i>Ilustración 3.20 - CPT1 Y CPT2, casos de asentamiento de reconsolidación volumétrica .....</i>	<i>94</i>
<i>Ilustración 3.21 - CPT1 y CPT2, resultados asociados al número de severidad de licuación (LSN). .....</i>	<i>95</i>
<i>Ilustración 3.22 - Comparación de ensayos CPT, comportamiento de la sollicitación cíclica del suelo, caso Y&amp;I. ....</i>	<i>97</i>
<i>Ilustración 3.23 - Comparación de ensayos CPT, comportamiento de la sollicitación cíclica del suelo, caso B&amp;I. ....</i>	<i>98</i>
<i>Ilustración 3.24 - Comparación ensayos CPT, mejora del F.S. según DSM y Columnas de grava, caso Y&amp;I .....</i>	<i>100</i>
<i>Ilustración 3.25 - Comparación ensayos CPT, mejora del F.S. según DSM y Columnas de grava, caso B&amp;I. ....</i>	<i>101</i>

## Índice de Tablas

<i>Tabla 2.1 - Condiciones favorables y desfavorables a tener en consideración para SCM y SCM-DH [13]</i> .....	24
<i>Tabla 2.2 - Ventajas y desventajas del ensayo CPT. [26]</i> .....	55
<i>Tabla 2.3 - Coeficientes para densidad relativa. [20]</i> .....	59
<i>Tabla 2.4 - tabla de interpretación de los parámetros de potencial de licuación (PL). [27]</i> .....	62
<i>Tabla 2.5 - Daños esperados por reconsolidación volumétrica y su representación en superficie.[29]</i> .....	63
<i>Tabla 2.6 - Rangos de LSN y sus respectivos efectos en la superficie.[30]</i> .....	63
<i>Tabla 3.1 - Coordenadas de los sondajes [35]</i> .....	65
<i>Tabla 3.2 - Descripción estratigrafía Sondaje 1 [35]</i> .....	66
<i>Tabla 3.3 - Descripción estratigrafía Sondaje 2 [35]</i> .....	66
<i>Tabla 3.4 - Descripción Sondaje 3 [35]</i> .....	67
<i>Tabla 3.5 - Coordenadas de los ensayos CPT [35]</i> .....	68
<i>Tabla 3.6 - Parámetros geotécnicos, obtenidos por sondajes para el suelo de fundación [35]</i> .....	69
<i>Tabla 3.7 - Cuadro resumen de mecanismo generados por las columnas de grava</i> .....	74
<i>Tabla 3.8 - Datos utilizados en el diseño de las columnas de grava</i> .....	74
<i>Tabla 3.9 - Configuración casos de diseño</i> .....	81
<i>Tabla 3.10 - Resumen costos de hormigón para diseños propuestos</i> .....	83
<i>Tabla 3.11 - Cuadro resumen sobre duración de la obra, utilizando DSM.</i> .....	85
<i>Tabla 3.12 - Partida asociada a la mano de obra mínima para poner en funcionamiento el sistema DSM para ejecutar un sistema de grillas</i> .....	86
<i>Tabla 3.13 - Partida asociada al costo de equipos para poner en funcionamiento el sistema DSM para sistema de grillas</i> .....	86
<i>Tabla 3.14 - Partida asociada al consumo de combustible para desarrollar la técnica DSM para formar un sistema de grillas</i> .....	87
<i>Tabla 3.15 - Costos finales de las partidas más relevantes para considerar en la ejecución de un sistema de grillas para el DSM.</i> .....	87
<i>Tabla 3.16 - Resumen final del presupuesto para ejecutar grillas de DSM.</i> .....	88
<i>Tabla 3.17 - Resumen de parámetros utilizados para el diseño de paneles, según CPT1 y 2</i> .....	89
<i>Tabla 3.18 - Valores destacados de comparación de métodos, caso Y&amp;I.</i> .....	99
<i>Tabla 3.19 - Valores destacados de comparación de métodos, caso B&amp;I.</i> .....	99
<i>Tabla 3.20 - cuadro resumen costos para diseño columnas de grava</i> .....	102

# 1. Capítulo: Introducción

## 1.1. Motivación

El tema que será desarrollado en el trabajo de título corresponde al estudio de la técnica de Deep Soil Mixing (DSM) o Mezcla de Suelo Profunda, esta técnica consiste en mejorar las propiedades mecánicas y físicas del suelo in situ. Esta mejora se consigue mezclando el suelo con cemento y/o compuestos aglutinantes para formar suelo mejorado, todo esto mediante columnas espaciadas o superpuestas distribuidas en la superficie del terreno que se desea mejorar (ver Imagen 1). [1]

Actualmente existen dos métodos para llevar a cabo el DSM, uno corresponde a la vía seca (aplicación en polvo) y el otro la vía húmeda (aplicación en forma de lodo). El suelo estabilizado o mejorado en la mayoría de los casos posee una menor permeabilidad, menor compresibilidad y una mayor resistencia respecto al suelo natural. [1]

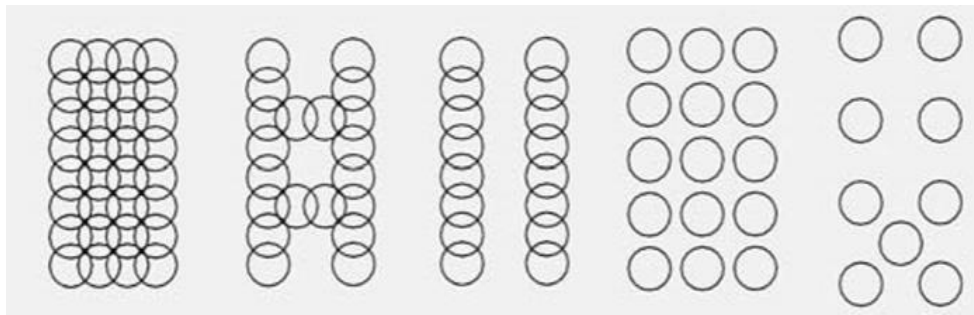


Ilustración 1.1 - Disposiciones de las columnas de suelo mejorado mediante DSM [1].

Se procede a explicar resumidamente la ejecución de la técnica Deep Soil Mixing por la vía húmeda (ver imagen 2), esta consiste en un sistema de penetración y extracción de una herramienta de mezclado, este proceso se facilita por la salida de lechada de cemento a través de una tobera en el extremo inferior de la broca helicoidal. Para mejorar la homogeneidad del suelo mejorado la herramienta puede moverse hacia arriba y hacia abajo a lo largo de la columna. [2]

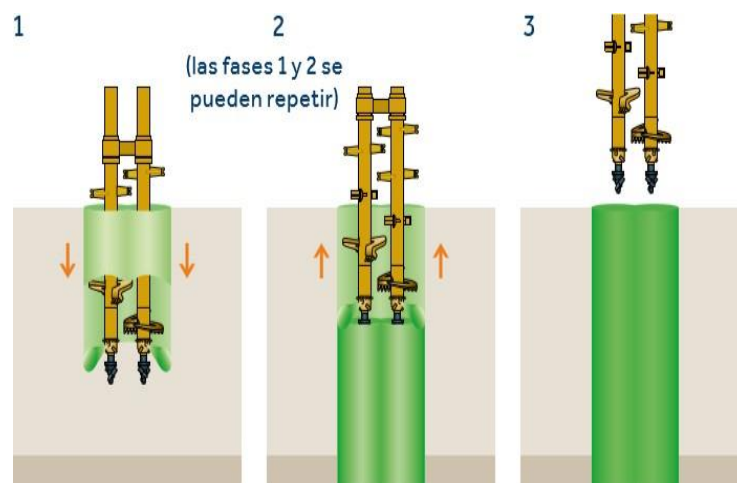


Ilustración 1.2 - Proceso de mezclado profundo por vía húmeda [2].

Para la técnica Deep Soil Mixing por la vía seca (ver Imagen 3) el aglutinante se adiciona cuando se están retirando los elementos de perforación, todo esto mediante mangueras que usan aire comprimido. Se puede regular la cantidad de aglutinante suministrado, también la presión del aire y la velocidad de rotación. Este método se recomienda para suelos con alto contenido de humedad para de esta forma facilitar la reacción con el aglutinante. [2]

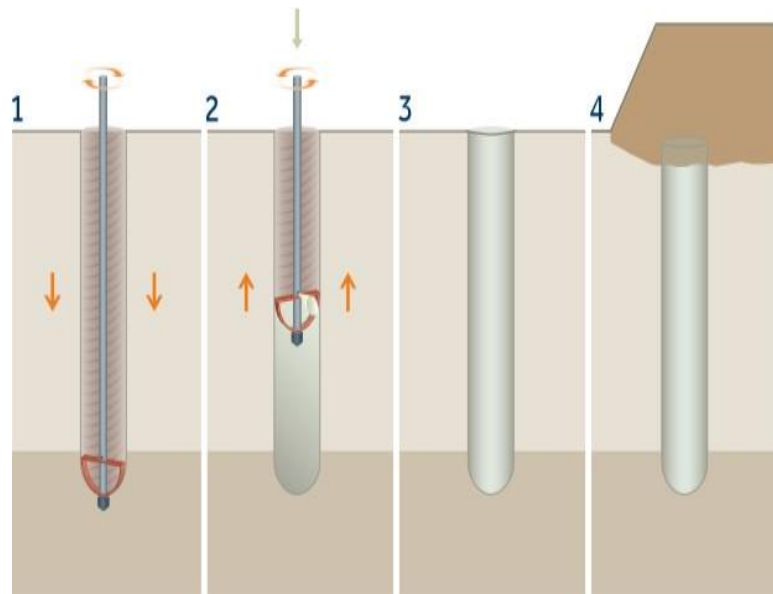


Ilustración 1.3 - Proceso de mezclado profundo por la vía seca [2].

Se escogió este tema porque es un método ampliamente utilizado en el mundo como técnica de tratamiento de suelos desde el año 1975. Este método se puede llevar a cabo en diversas aplicaciones que se mencionan a continuación:

- Terraplenes de carreteras y ferrocarriles.
- Soporte de zapatas aisladas o corridas.
- Pilas y estribos de puentes, cimientos de turbinas eólicas.
- Sistemas de contención y refuerzo de excavaciones.
- Estabilización de taludes.
- Mitigación de potencial de licuación,
- Muros pantalla y barreras contra filtración.

[2]

La técnica presenta diversos beneficios como puede ser el uso en su ejecución de aglutinantes no tóxicos para el medio ambiente, un tema contingente a nivel mundial. Otra ventaja es que utiliza el terreno in situ, esto evita el movimiento de suelos y el uso de vertederos para depósitos de material; además el Deep Soil Mixing es un método bastante flexible ya que se adapta al tipo de suelo como al tipo de estructura. [1]

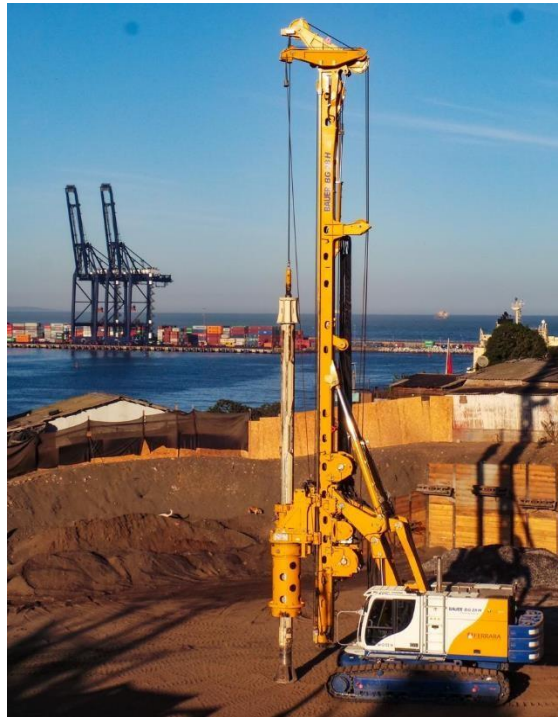
Este método se originó en Japón y Suecia, uno enfocado en la vía húmeda y el otro en la vía seca, pero actualmente la técnica Deep Soil Mixing ganó tal popularidad que es usado en el Sudeste Asiático, Estados Unidos, Europa Central y el resto de los países Nórdicos. [3]

El Deep Soil Mixing todavía no es utilizado en Chile, pero creemos que puede aplicarse debido a que mejora el comportamiento sísmico de suelos de baja capacidad geotécnica, de esta forma transformarse en una alternativa a métodos convencionales que se utilizan en Chile como son los pilotes pre-excavados, columnas de grava, jet grouting por nombrar algunos ejemplos.

El enfoque de este trabajo de título consiste en estudiar la factibilidad técnico-económica de aplicar un tratamiento con columnas Deep Soil Mixing en un proyecto de Edificación ubicado en 1 Norte y 5 Oriente, Viña del Mar, donde el estudio geotécnico ha identificado un potente estrato de arenas potencialmente licuables. Además, se tomarán consideraciones debido a la ubicación de la obra en la denominada falla del marga-marga como se menciona en un documento de Robert Thorson [4].

La columna de grava corresponde a un método originado en la década del 50, en sus inicios se creó debido a la necesidad de transmitir las cargas de la estructura que se encontraban en suelos arcillosos o blandos hacia capas más profundas que resultaban ser más competentes, mejorando además la estabilidad de los suelos y reduciendo la consolidación.[5]

De esta forma evaluar la viabilidad de este método con respecto a las alternativas que comúnmente se utilizan en Chile como lo son las columnas de grava, todo enfocado sobre aspectos técnicos, económicos, de trabajabilidad, tiempo de realización, en cuanto a propiedades mecánicas y aspectos que aparezcan en el camino y se consideren relevantes para mencionar en el estudio/realización del método. Todo esto con la finalidad de concluir con argumentos técnicos la aplicación/viabilidad del DSM en suelos chilenos.



*Ilustración 1.4 - Perforadora modelo BG28-H perteneciente a Ferrara Proyecto Especiales.*

## **1.2. Objetivos:**

### **1.2.1. General**

El principal objetivo de este trabajo es estudiar la técnica de Deep Soil Mixing (DSM) respecto a sus aplicaciones, metodología de diseño, procedimientos de ejecución y plan de control de calidad para garantizar su correcta aplicación en la solución a problemas geotécnicos, asociados a la licuación en Chile.

### **1.2.2. Específicos**

El trabajo permitirá entregar una guía de diseño para que sea utilizada por Ingenieros Civiles que quieran implementar un tratamiento con Deep Soil Mixing en suelos chilenos.

En lo particular se desea profundizar los conocimientos respecto a su comportamiento para mejorar la capacidad de los suelos y lograr mitigar el fenómeno de licuación ante un evento sísmico.

Investigar este método como una opción más eficiente respecto a los demás métodos, logrando resultados similar al otro método que se escogió para comparar, pero en menor tiempo y con menor inversión económica.

## 2. Capítulo: Deep Soil Mixing (DSM)

### 2.1. Prologo

Los métodos de soil mixing son utilizados principalmente en suelos con algún grado de contaminación y/o suelos blandos, como pueden ser arcillas blandas, limos y arenas de grano fino, También es posible estabilizar suelos orgánicos, pero existen requerimientos adicionales en estos casos.

Su uso ha ido aumentando progresivamente desde su origen, esto se debe principalmente a su flexibilidad y fácil adaptación a los requerimientos de diseño y/o factores del lugar donde se implementará. La mezcla de suelo es generada in situ, esta mezcla resultante del suelo mejorado tiene generalmente mayor resistencia, menor permeabilidad y comprensibilidad que el suelo original. Estas características no solo dependerán del aglutinante aplicado a cada caso además influye las características de cada suelo y las condiciones en que se mezcla en la ubicación del proyecto. [8]

Este método tiene variadas aplicaciones marinas y terrestres, donde destacan estabilización de suelos, mitigación de suelos licuables, refuerzo de suelos blandos mediante columnas de suelo mejorado, construcción de muros de contención con secciones de acero, entre otras. [8]

Soil mixing puede separarse en dos caminos: Métodos de mezcla profunda y métodos de mezcla superficial. En esta memoria solo se abordará el abanico correspondiente a la mezcla profunda (DM). [9]

### 2.2. Historia

El método se desarrolló en paralelo durante los años sesenta en Suecia y Japón, debido a las condiciones de suelo que hay en estos dos lugares, Suecia tuvo avances sobre la vía seca y en Japón la vía húmeda. En sus inicios el material externo que se usaba para la mezcla era la cal viva, y su función era estabilizar arcillas y reducir los asentamientos que estas generaban.

En la época de los ochenta en Suecia fue la técnica de mejora de suelos más utilizada para expandir sus carreteras. En los noventa ya se maneja un gran número de materiales de mezcla como lo son bentonita, yeso, cenizas volantes entre otros. Además, con los nuevos avances y tecnologías sobre el DSM se amplió la aplicación para terrenos hasta ahora no tratables.[3]

Hoy en día los japoneses estabilizan sus suelos dejándolos además impermeables, mientras que en los países nórdicos la estabilización de suelos mediante el DSM también funciona como un sistema de drenaje vertical. [3]

### 2.3. Aplicaciones

Los métodos de soil mixing presentan la ventaja que tiene un gran ámbito de aplicación, esta varía tanto en el tipo de estructura como en el tipo de suelo, a continuación, se presentan aplicaciones para este método, pero al estar en constante investigación y evolución no se descartan nuevas aplicaciones en el futuro por este método se recomienda ir actualizándose constantemente con los nuevos avances que se presenten.

Se menciona los usos más demandados de soil mixing y los países que más ejecutan este método según el área de aplicación hasta el 2004 [8].

- 1) Refuerzo de la Fundación (Japón, Escandinavia, Estados Unidos, Francia, Polonia).
- 2) Sistemas de Contención de Suelos (Japón, Estados Unidos, China, Sudeste Asiático, Alemania).
- 3) Tratamiento de Suelos (Japón, Estados Unidos, Finlandia, Suecia, Sudeste Asiático).
- 4) Mitigación de la Licuefacción (Japón, Estados Unidos).
- 5) Muros Impermeables (Japón, US, Alemania, Polonia).
- 6) Remediación Medio Ambiental (Estados Unidos, Reino Unido).

Gran parte de los trabajos realizados con soil mixing se usan para funciones combinadas, esto significa que algunas obras/proyectos efectuados por estos países entrarían en más de las categorías mencionadas.

### 2.3.1. Contención de Terreno

Los sistemas de retención surgen por la necesidad de reprimir el movimiento de tierra que es generado por las excavaciones profundas o cortes verticales en terrenos de suelos blandos o con baja cohesión y de esta manera proteger a las estructuras que rodean la obra, también prevenir desplazamientos de tierra desde las pendientes que existan o se formen en el lugar.

Para estos casos se emplean columnas de DM las cuales deben cumplir con valores de resistencia al corte y rigidez que aseguren un comportamiento aceptable según sea el diseño del proyecto, otros requisitos son que las columnas deben ser homogéneas entre sí, mantener la verticalidad y establecer contacto continuo entre ellas. También es importante que la resistencia obtenida por las columnas primarias sea tal que cuando se instalen las columnas secundarias se eviten problemas de derrumbe. Los tubos de acero o las vigas del tipo "H" pueden ser instalados en columnas de DM ejecutadas con el método húmedo para aumentar la resistencia a la flexión y crear un muro estructural para el soporte de la excavación.

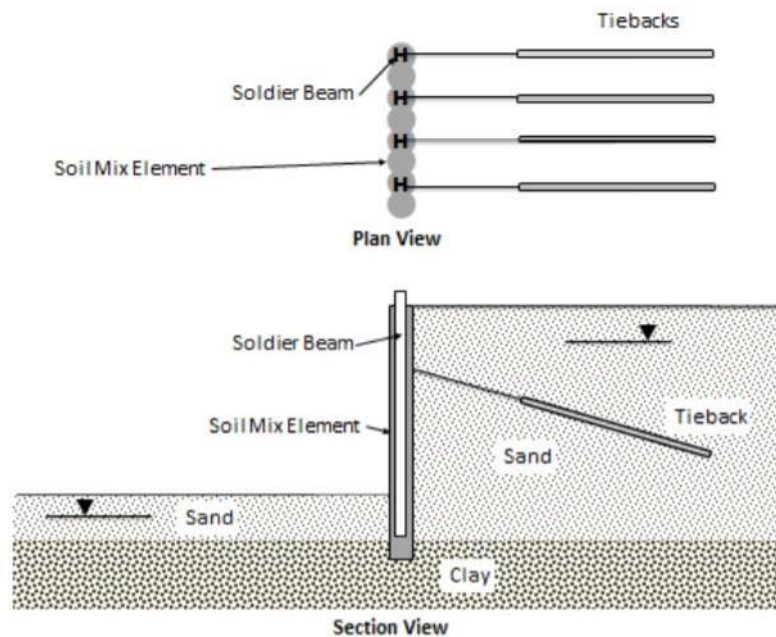


Ilustración 2.1 - Ejemplo de aplicación con un sistema de barrera impermeable [8].

En el caso de ser necesario pueden instalarse sistemas de drenaje detrás de los muros con la finalidad de evitar el aumento de presiones de poros. [8]

### **2.3.2. Mitigación de licuefacción**

El procedimiento consta de un muro perimetral para aislar el suelo bajo la estructura, con esto se consigue que baje el nivel de agua subterránea de forma permanente, asegurando una zona no licuable bajo la estructura.[10]

El refuerzo de los suelos licuables se ejecuta mediante un sistema de mallas, muros o celdas. Esta última siendo especialmente efectiva debido a tratar la zona como una unidad, y así distribuir la resistencia a compresión del suelo tratado.

La construcción de sistemas aislantes compuestos por muros de corte puede usarse como una técnica para al mitigar la licuefacción. El sistema de grilla mejora el comportamiento del suelo encerrado de 3 formas:

- 1) Reduciendo las tensiones de corte que se producen en el suelo encerrado, disminuyendo la generación de presiones de poros.
- 2) Proporciona resistencia contra deformación lateral y asentamiento vertical incluso si la licuefacción se produce en suelos aislados.
- 3) Además, entrega una barrera con la migración de presiones de poros de suelo no mejorados alrededor del área encerrada por la red/sistema.

La efectividad del DMM para prevenir la licuefacción ha sido confirmada durante el terremoto de magnitud 7.2 en Kobe en el año 1995. Un hotel que se estaba construyendo en una zona de arena recuperada, apoyado en muelles perforados, sobrevivió en realidad porque los muelles han sido protegidos con una configuración de red de DM contra la licuefacción y el flujo lateral [8]. En contraste, los diques que rodean tres lados del hotel sufrieron grandes movimientos laterales hacia el mar, como lo hicieron otros diques en la zona los cuales no contaban con un sistema de DSM. [10]

La mitigación de la licuefacción puede ser proporcionada por una reja o celdas de elementos mixtos formada por columnas o paneles superpuestos. Las rejillas o celdas encierran volúmenes de suelos licuables que impiden que fluyan lateralmente durante un evento sísmico (Imagen 2.2). Las rejillas o celdas pueden instalarse como columnas o paneles secantes utilizando métodos de mezcla de eje simple o múltiple. El control de la licuefacción también puede obtenerse mediante la estabilización de la masa para tratar el 100% del suelo licuable, aunque esto puede ser costoso. [7]

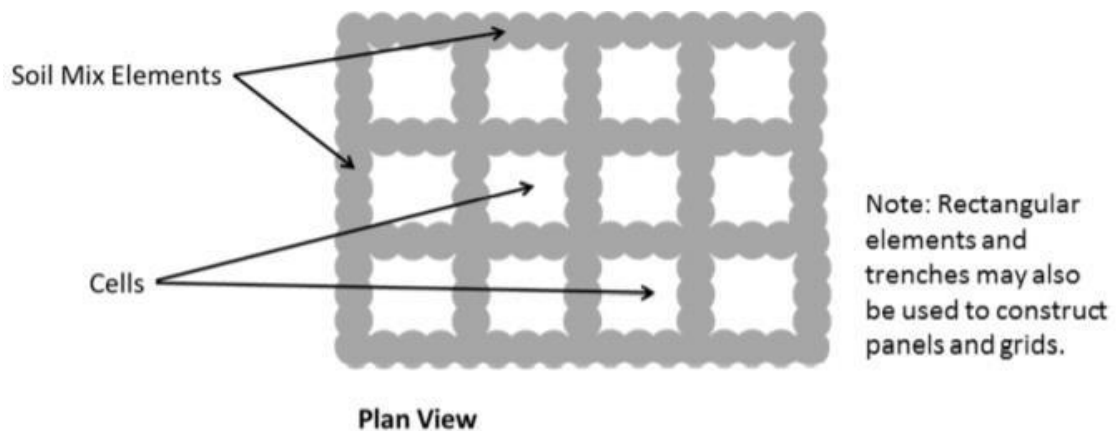


Ilustración 2.2 - Ejemplos de sistemas de soil mixing para mitigar licuefacción [7].

El uso de una rejilla o red de distribución es especialmente efectivo. Las " celdas " reducen la tensión de cizallamiento y la excesiva acumulación de presión en los poros y contienen zonas locales licuadas durante los eventos sísmicos, previniendo el desplazamiento lateral.

La prevención sísmica por medio de DM a las estructuras existentes comprende también las paredes perimetrales instaladas para aislar y contener los suelos licuables bajo la estructura. El agua subterránea dentro de la zona cerrada baja permanentemente para proporcionar condiciones no licuables. Esta solución se utiliza cuando no son viables otras medidas correctivas más convencionales. [8]

### 2.3.3. Mejora del comportamiento del suelo

Usar Deep mixing tiene como ventaja reducir los asentamientos y aumenta la capacidad de soporte de suelos débiles/blandos, como disminuir los fallos por deslizamiento. Las recomendaciones son las siguiente, se instalan columnas con espaciamiento variable cuando el objetivo es reducir asentamientos, y sistemas de mallas o combinaciones de muros cuando se refiere a soportar cargas elevadas. [8]

La capacidad de carga de los suelos débiles puede mejorarse utilizando columnas o paneles, ver Imagen 2.3. Estos elementos funcionan como nodos rígidos que permiten que las cargas de las zapatas tiendan un puente sobre los suelos más débiles.

El DMM seco puede utilizarse para tratar suelos de baja resistencia y alto contenido de agua. Este tipo de mejora del suelo puede realizarse utilizando métodos de eje único y múltiple, entre otros métodos de perforación de DSM. La resistencia del suelo tratado combinado y del suelo circundante debe ser suficiente para soportar las cargas de los cimientos con los típicos factores de seguridad de la capacidad de carga.[7]

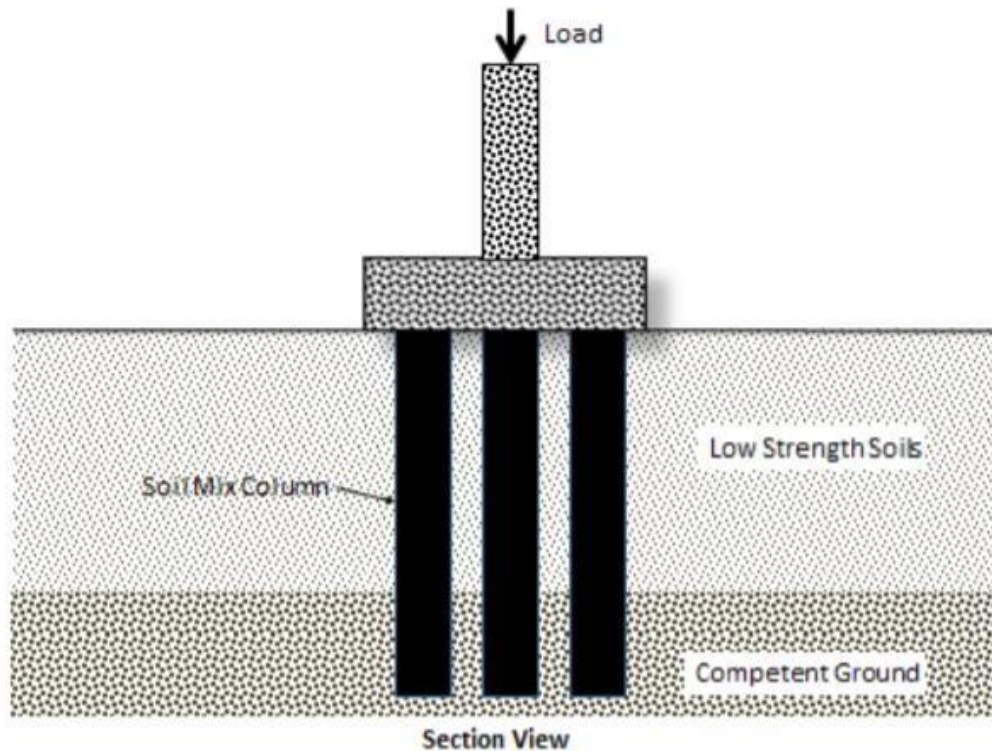


Ilustración 2.3 - Ejemplo de aplicación sobre mejoramiento de suelos por SM [7].

#### 2.3.4. Fundaciones profundas

Como es mencionado en la sección de muros de retención, existe la opción de incorporar en las columnas de soil mixing elementos de acero como pueden ser barras tipo "H" con la finalidad de mejorar el rendimiento estructural (ver imagen 8). Estos elementos deben instalarse cuando la columna aún está fresca, y se agregan por peso propio sin hincar, de esta forma se reduce la contaminación acústica y las vibraciones.

De esta forma la capacidad del elemento de acero aumenta porque la carga es transferida a través del perímetro total del elemento mixto de suelo, y no a lo largo de la superficie más pequeña de la sección de acero. [7]

Si bien los elementos de acero suelen instalarse hasta la profundidad total de la columna de soil mixing, se debe mencionar que las columnas no reforzadas también son capaces de soportar cargas axiales considerables.

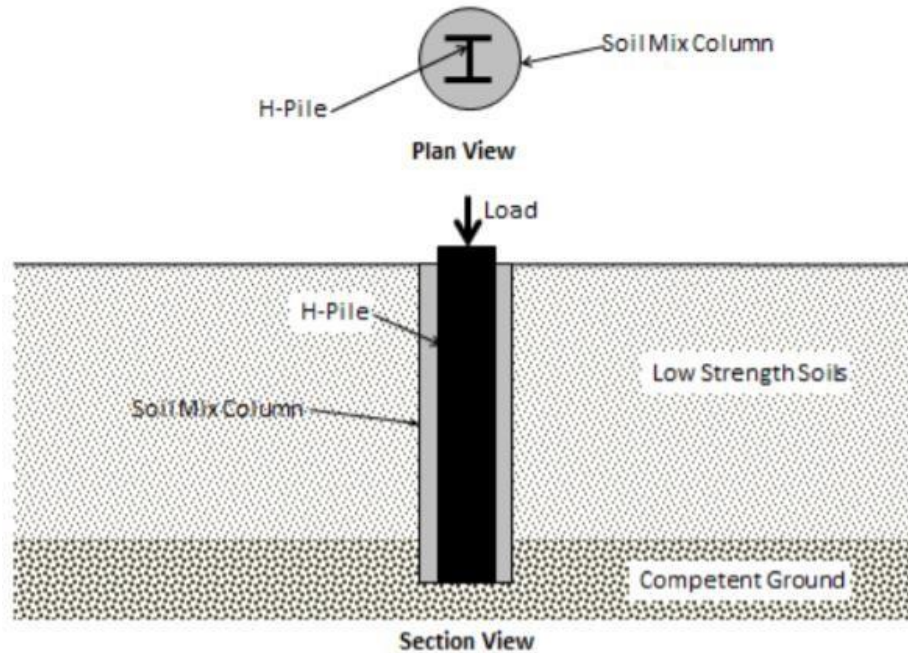


Ilustración 2.4 - Ejemplo para sistemas de fundaciones profundas [7].

### 2.3.5. Control de filtraciones de aguas subterráneas y pantallas impermeabilizantes (Cut-off)

Los cortes para el control de filtraciones se generan mediante un sistema de columnas adyacentes entre sí que interceptan la trayectoria de un flujo que genera una filtración en el sector. Las columnas se instalan a través de estratos impermeables hasta llegar a lechos rocosos, imagen 2.6. Los suelos tratados suelen ser depósitos gruesos altamente permeables, o estratos intercalados de suelos de grano fino y grueso.[10]

Se pueden construir barreras impermeables para controlar el agua utilizando pilotes secantes o paredes de paneles, como se describe para las aplicaciones de retención de tierra, con la excepción de que no se utilizan elementos de refuerzo. En la imagen 2.5 se muestra el uso de columnas secantes para construir una barrera de filtración para una excavación.



Ilustración 2.5 - Cut-off wall con columnas DSM ejecutadas de forma secante [11].

Cuando se habla de pilas secantes, se refiere a columnas de soil mixing que son ejecutadas de manera alternadas (se ejecutan columnas primarias en una primera forma y después se ejecutan las secundarias para darle continuidad al muro) de esta forma evitar desprendimiento o colapso de las columnas.

También pueden utilizarse muros impermeables para generar una obstrucción en el flujo de aguas subterráneas mixtas profundas para rodear y aislar en su lugar el suelo y las aguas subterráneas contaminadas. [7]

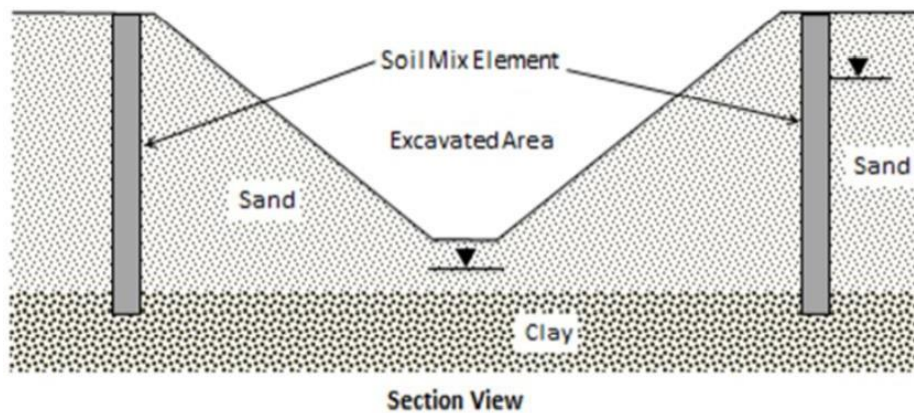


Ilustración 2.6 - Ejemplo de aplicación para controlar aguas subterráneas [7].

Los cortes hidráulicos se construyen instalando paredes de DM para interceptar las vías de flujo de filtración. Las columnas/paneles se instalan típicamente a través de los estratos permeables hasta algún nivel de corte, normalmente se recomienda penetrar 0.5 - 1 [m] en una capa de arcilla o

terminando en la parte superior del lecho rocoso. Los suelos tratados son generalmente depósitos gruesos altamente permeables, o estratos intercalados de suelos de grano fino y grueso. [8]

Dado que la conductividad hidráulica y la continuidad de la pared de corte son de importancia primaria, el diseño cuidadoso de las mezclas de lechada adaptadas a las condiciones del suelo, y un control adecuado de las zonas superpuestas y la verticalidad se requieren. [8]

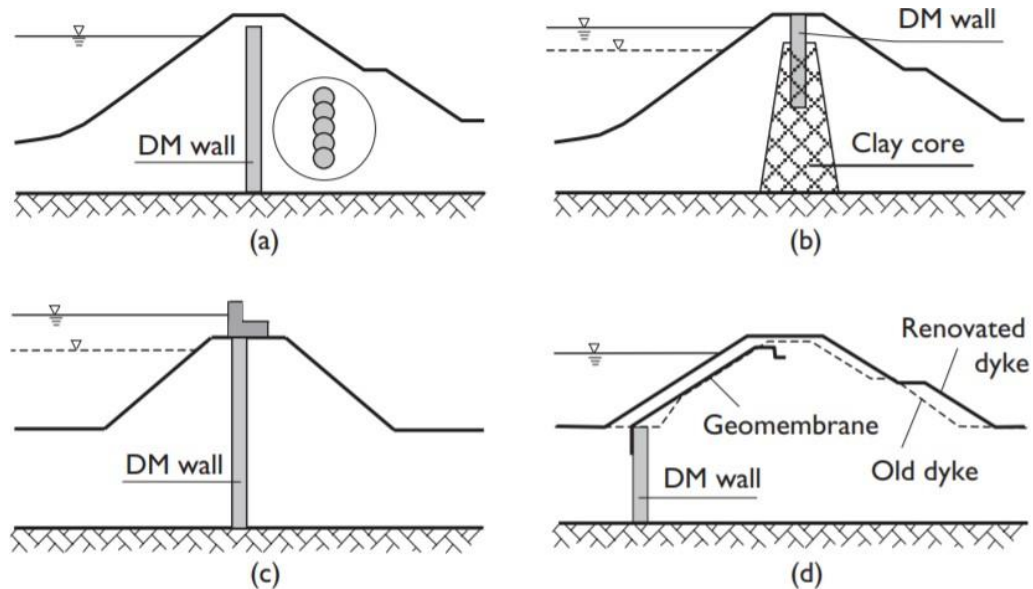


Ilustración 2.7 - Algunos ejemplos de DSM para muros impermeables. a) barrera impermeable en embalse b) núcleo de arcilla c) dique con superestructura instalada encima d) protección de infiltraciones. [8]

### 2.3.6. Contención del material contaminado

Las aplicaciones ambientales surgieron en los principios de 1990 consisten principalmente en la instalación de barreras de contención y en la solidificación/estabilización de suelos y lodos contaminados. Esto es más fácil en suelos arenosos pero muy difícil en suelos arcillosos. A nivel experimental, la mezcla de suelos también se ha utilizado para introducir lechada a base de microorganismos con fines de biorremediación (tratamientos para recuperar a calidad del suelo original), reactivos ácidos/base para la neutralización y reactivos de oxidación para la reacción química.[8]

Con materiales apropiados mezclados con el suelo, como los silicatos de alúmina modificados, y capacidades de adsorción, las compuertas actúan como tamices microquímicos, eliminando los contaminantes de las aguas subterráneas a su paso y permitiendo, en principio, sólo limpia el agua para emerger en el otro lado. En el DM las barreras de contención son adecuadas para los vertederos de desechos existentes y las nuevas instalaciones de vertido. Sin embargo, la composición de la lechada y las reacciones del aglutinante con los contaminantes en la perspectiva de corto y largo plazo son factores clave en el éxito de tales aplicaciones.[8]

La estabilización de la masa puede realizarse mediante la instalación de columnas o paneles superpuestos (Imagen 2.8) a lo largo de grandes extensiones de suelo con diversos fines geotécnicos o de remediación ambiental:

- Para mejorar la capacidad de carga del suelo in situ.
- Para inmovilizar el suelo o los sedimentos contaminados.

- Para mejorar la estabilidad de la base en las excavaciones. [7]

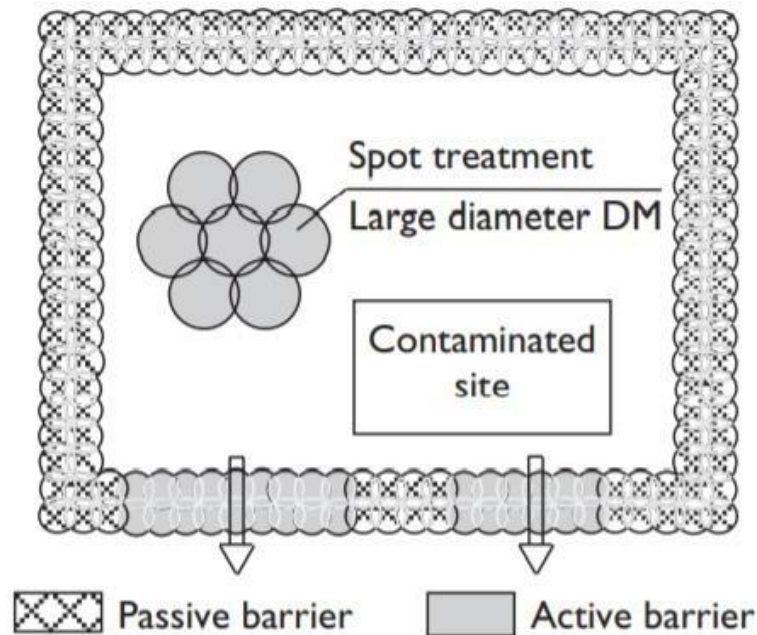


Ilustración 2.8 - Ejemplo de aplicación de barrera en un sistema contaminado [8].

## 2.4. Métodos de Mezcla

Como se mencionó anteriormente, el deep soil mixing tuvo sus orígenes en Suecia y Japón en paralelo cerca de los años 70s donde se desarrolló el DSM, pero con opciones de ejecución diferentes debido a los niveles de humedad que presentaban los suelos. En Japón se dio origen al método húmedo y en Suecia al método seco. En términos generales se refiere a la forma en que se adiciona el ligante, para el wet method es en forma de lechada, mientras que el dry method el ligante es agregado en polvo mediante aire comprimido para reaccionar con el contenido de humedad que presenta el suelo a mejorar.

Empresas especializadas en DSM como recomiendan utilizar el wet method cuando los suelos estén compuestos por arcillas blandas, limos y arenas finas con un contenido de humedad bajo, también para suelos estratificados con capas blandas y densas intercaladas. Mientras que dry method usarlo con condiciones de suelos blandos con un contenido de humedad alto, de esta forma facilitar la reacción in situ de mezcla. [11]

DSM también puede utilizarse para suelos orgánicos adaptar el procedimiento y considerar aglutinantes especiales.

### 2.4.1. Vía Húmeda (Wet Method)

El método consiste en insertar un sistema de perforación (puede ser una barra de perforación simple o múltiple depende del sistema que se posea) que tiene anexada barras transversales y además un martillo perforador en su extremo. Mientras se realiza la perforación no se generan vibraciones, y esta es ayudada por un flujo de salida correspondiente a lechada, la lechada sale por toberas ubicadas en el extremo de la broca que está en contacto con el suelo, también pueden salir un flujo

de lechada de cuchillas de mezclado (en el caso del sistema de perforación cuenta con ellas). En ocasiones esta lechada es menos densa de lo especificado en el diseño pues solo tiene como función apoyar la perforación.

Una vez se llega a la profundidad especificada en diseño, comienza la etapa de construcción de la columna DSM donde la herramienta de mezclado puede moverse hacia arriba y hacia abajo a lo largo de la columna para lograr la homogeneidad del soil mix, todo esto con la inyección de la lechada especificada en diseño. Según su función las columnas pueden variar su diámetro entre 0,6 a 2,4 metros [10]. Como se ha mencionado anteriormente pueden agregarse refuerzos de acero para aumentar la capacidad de flexión de la columna.

### **2.4.2. Vía Seca (Dry Method)**

Como se mencionó en 2.4. el método por la vía seca sea viable el suelo a tratar debe tener una humedad superior al 30% de esta forma se asegura que exista una reacción entre el suelo y el material aglomerante [1].

La ventaja de usar dry method es permite trabajar en suelos profundos que a su vez son muy blandos, incluso considerar suelos orgánicos de manera eficiente, generando muy pocos desechos y a un costo que competitivo [10]. Además, puede aplicarse en condiciones de temperaturas bajas.

El equipo mínimo necesario para implementar el dry DSM corresponde a una planta de almacenamiento (estacionaria o móvil) de aglutinantes, un equipo de perforación de columnas de soil mixing, y una herramienta de mezclado en el extremo del varillaje de mezcla. Los diámetros de diseño son menores que para el wet method y oscilan entre 0,6 a 1 metros y llegan a profundidades hasta 25 metros [10].

El aglutinante se impulsa mediante aire comprimido a través de una conexión de mangueras. Es se te adiciona mientras se retira el sistema de perforación, el cual rota en dirección opuesta a la que se perforo. El operador de la perforadora puede variar la velocidad de rotación y con esto se consigue variaciones en la cantidad de aglutinante. Se debe tener en consideración que arcillas plásticas y limos es recomendable usar aglutinantes como cal o cemento con cal. [11]

## **2.5. Consideraciones Constructivas**

En esta sección ahondaremos en las consideraciones y observaciones que se deben realizar para ejecutar las columnas de soil mixing, ya sea por el método de Single Column Mixing y además por un método relativamente nuevo empleado por la empresa Bauer que tiene por nombre Single Column Mixing – Double Head (SCM - DH) mencionando sus ventajas y limitaciones para ejecutar el DSM.

### **2.5.1. Características del método**

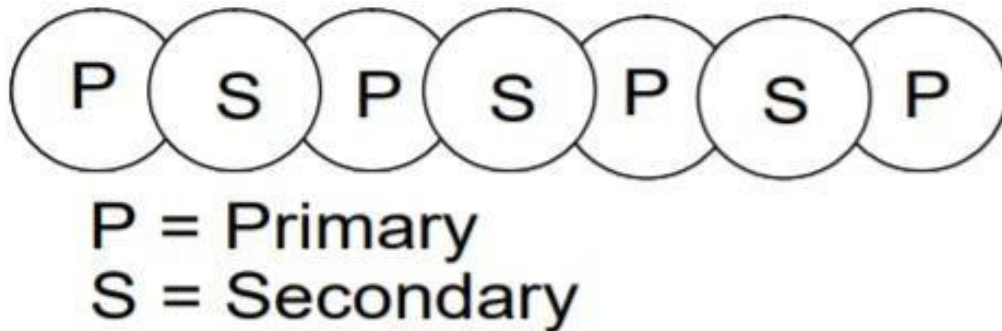
Comenzamos por las cualidades que proporciona usar la técnica SCM y/o SCM-DH:

- Alta productividad, esto se debe principalmente que el método usa tecnología moderna el cual ajusta los parámetros con los que se trabajara por este motivo las columnas se ejecutan en el tiempo estipulado.
- El mismo suelo natural es usado como material en la ejecución de las columnas al combinarse con la lechada, esto elimina/reduce el gasto que conlleva traer material de relleno a la obra.
- Una baja generación de desechos debido al uso del mismo suelo natural. Esto toma gran importancia cuando se usa en suelos contaminados. El porcentaje de suelo que debe eliminarse varía entre 15-50% del volumen de la columna de soil mixing [13].

- SCM no emite vibraciones, esto es importante a la hora de trabajar en suelos blandos, con poca cohesión, en las proximidades de otras estructuras o en zonas céntricas de las ciudades.
- Al requerir lechada de preparación in situ o cemento en polvo, la obra no necesita de hormigón fresco traído desde plantas especializadas. Esto toma valor cuando el proyecto se ubica en zonas lejanas o de difícil acceso y para el caso contrario, en sectores de las ciudades muy céntricos o congestionados por el tránsito de vehículos.
- Para el método húmedo la eyección de la lechada ocurre a presiones bajas. Con estos las tuberías, estructuras, túneles por nombrar algunos que se encuentren circundantes a la obra no corren riesgo que la lechada afecte su rendimiento. Además, esto logra que el diámetro de la columna solo depende de las demás herramientas de perforación. Las bombas que se utilizan alcanzan presiones máximas entre 10 - 20 bar [13].

### 2.5.2. Formación de muro continuo

La instalación de columnas para formar sistemas continuos se logra distribuyendo las columnas en primeras y secundarias, ejecutando las primeras de forzar intercalada y en primera instancia y luego ejecutando de forma secante las secundarias (entre 2 primarias) esto con la finalidad de evitar desprendimiento de las paredes. Es recomendado dejar superpuestas las columnas primarias y secundarias en un rango entre 100 -300 milímetros [12].

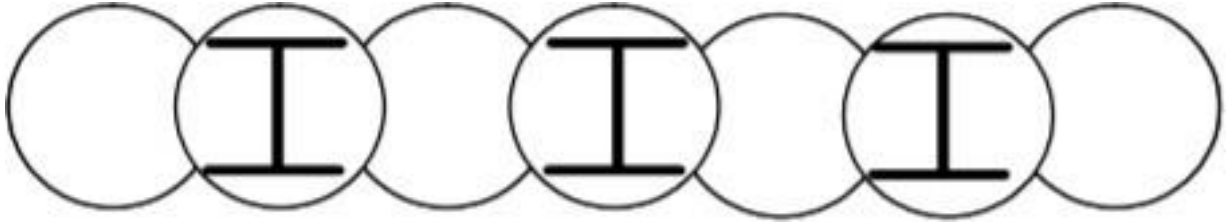


*Ilustración 2.9 - Representación de columnas secantes [13].*

### 2.5.3. Instalación de refuerzo

Como se mencionó en la sección 2.3. puede añadirse al diseño elementos de refuerzo con propósitos estructurales a las columnas de soil mixing, los más usados corresponden a barras de acero. Las cuales se introducen por su propio peso, también puede usarse un vibrador para facilitar la aplicación.

La distancia entre los elementos de refuerzo y su tamaño se diseñan en función de las cargas aplicadas y de los resultados de la resistencia característica de la mezcla de suelo y aglutinante [12].



*Ilustración 2.10 - Refuerzos en columnas de soil mixing [12].*

#### **2.5.4. Procedimiento de Trabajo**

Es sugerido, excavar una pequeña pre-zanja en el lugar donde se hará la mezcla de suelo, con la finalidad de recoger el material que se genere como desecho, los cuales generalmente son material de suelo y/o excedente de la lechada, además de algún componente que se esté utilizando.

Otro consejo es cuando la superficie donde se desplazará la maquinaria no es firme, se recomienda utilizar placas de acero en la base.



*Ilustración 2.11 - pre-zanja en la fase inicial del procedimiento [12].*

Se describen en pasos el procedimiento para generar una columna de soil mixing usando el sistema SCM o SCM-DH:

- El primer paso es posicionar la maquinaria.
- Después la maquina comienza la perforación en paralelo el suelo es cortado por las herramientas exteriores del sistema, además en caso de ser el método húmedo se inyecta lechada mediante una manguera conectada al mástil mientras se perfora, si corresponde al caso seco se agrega el material de mejoramiento una vez se llega a la profundidad máxima. Los parámetros como velocidad de perforación o cantidad de aglomerante utilizado son regulados de tal forma que se genere el mínimo de desperdicios en a la superficie.
- Alcanzada la profundidad requerida/solicitada, la herramienta de perforación se retira mientras sigue rotando, además puede insertar y extraer la herramienta para mejorar el soil mixing.
- Según sean los requisitos pueden añadirse elementos como barras de acero, cuando aun no se endurece la columna.

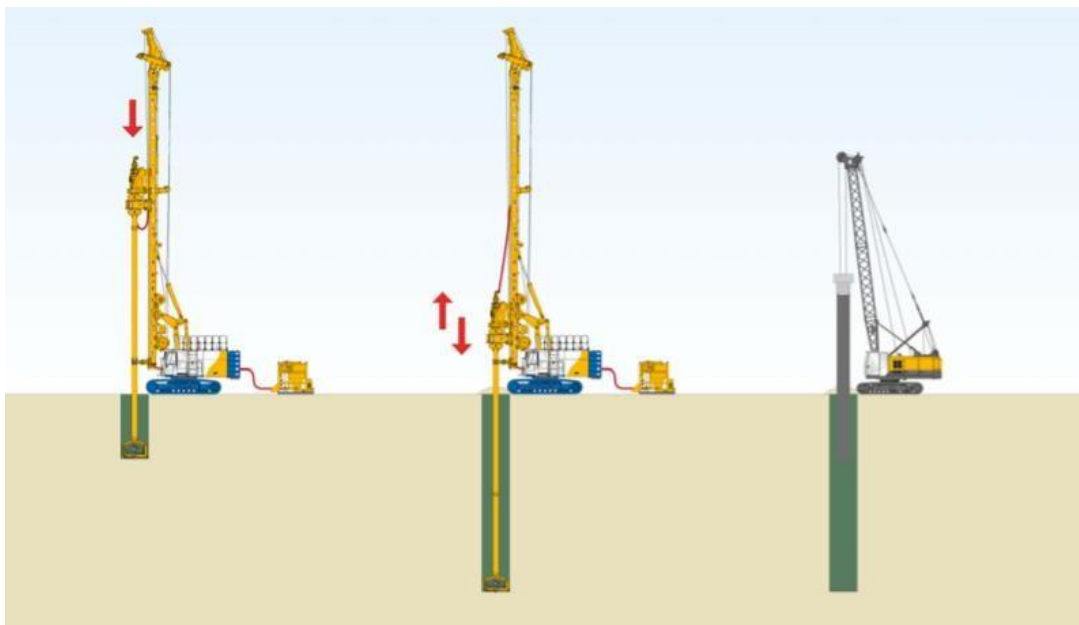


Ilustración 2.12 - Visualización de las etapas para ejecutar un CM [14].

### 2.5.5. Factores de Productividad

A continuación, se presenta una tabla donde se consideran factores que afectaran el rendimiento positiva o negativamente del SCM y SCM-DH

Tabla 2.1 - Condiciones favorables y desfavorables a tener en consideración para SCM y SCM-DH [13].

	<b>Condiciones Favorables</b>	<b>Condiciones Desfavorables</b>
<b>Estructura de Suelo</b>	Uniforme	Formación de Suelo en Capas (alternados)
<b>Tipo de Suelo</b>	Arena gravosa densidad entre suelta a medio densa	Formación de suelo denso, piedras, suelo duro y cohesivo, suelo orgánico
<b>Geometría del lugar de Construcción</b>	Hileras rectas de las columnas	Diseño en Angulo c/r a la Pared
<b>Profundidad de la Columna</b>	Profundidad de Columnas > 10 [m]	Profundidad de Columnas < 10 [m]

La importancia que existan capas uniformes de suelo radica, en que la columna debe ser homogénea en toda su profundidad, si existe más de una capa de suelo debe ir modificándose la configuración de los parámetros de diseño, por eso resulta con menos complicaciones un suelo uniforme.

Con respecto a los tipos de suelos este sistema está enfocado en suelos relativamente blandos, por lo que el sistema de perforación no está diseñado para trabajar en suelos pre-consolidados o duros. Debido a la geometría de la obra, es mejor para la máquina perforadora trabajar en filas de columnas rectas para evitar movimientos innecesarios es por eso que trabajar con columnas que deben instalarse con algún grado de inclinación no está permitido o se encuentra limitado (según el método de aplicación).

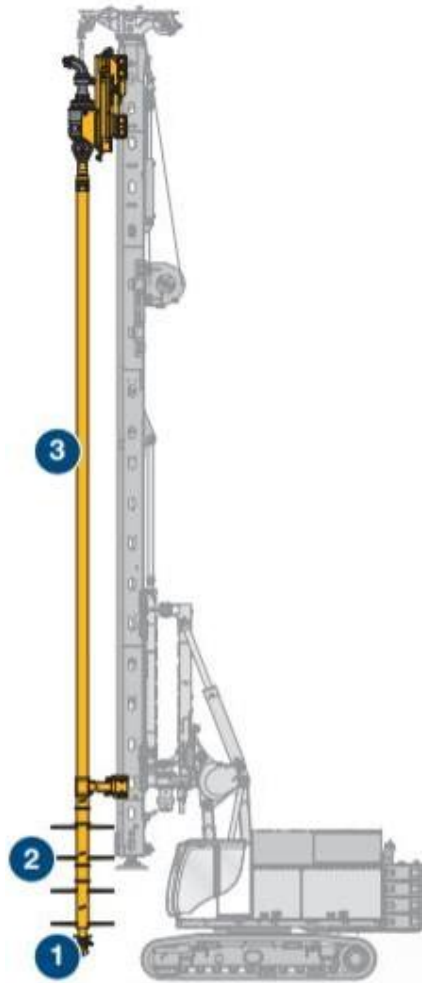
El posicionar el sistema de perforación al ser un equipo de dimensiones grandes toma tiempo, es por eso se suelen utilizar en sistemas de columnas con profundidad mayor a 10 metros de esta forma invertir de forma correcta el tiempo que tarda en posicionarse y prepararse, de esta forma el disminuir el tiempo improductivo.

## 2.5.6. Herramientas de Perforación

En esta sección solo se abordará el tema de la herramienta de penetración para ambos sistemas, en la sección 2.5.7. se referirá a el sistema que componen los métodos húmedos y secos.

### 2.5.6.1. Single Column Mixing (SCM)

En términos generales la herramienta de perforación y mezcla está constituida de 3 secciones, la primera corresponde a un taladro el cual corta el suelo, además en su exterior contiene dos cuchillas con dientes planos y un bit en la posición central. Otra sección corresponde a una barra de perforación equipadas con palas en su contorno con la finalidad de homogenizar el lodo que ingresa y que se mezcla con el suelo del lugar, esta sección termina en las tuberías de extensión. Los tubos de extensión permiten la penetración de la herramienta mezcladora reducción la fricción de esta con las paredes de la columna.



*Ilustración 2.13 - Herramienta de perforación enumerada en sus 3 secciones [13].*

- 1) La broca ubicada en el centro más y dos palas con dientes planos son los encargados de aflojar y cortar el suelo. Mientras esto ocurre se inyecta lechada (para el caso húmedo) de manera continua, la mezcla es inyectada desde toberas que se ubican por el radio de la herramienta, que tiene por finalidad estabilizar, licuar y adherir esta con el suelo.
- 2) En esta sección se encuentran ubicadas otras palas mezcladoras las cuales logran la mezcla homogénea entre la lechada y el suelo.
- 3) Esta sección puede modificarse para lograr las profundidades requeridas generando fricciones nulas en toda su longitud.

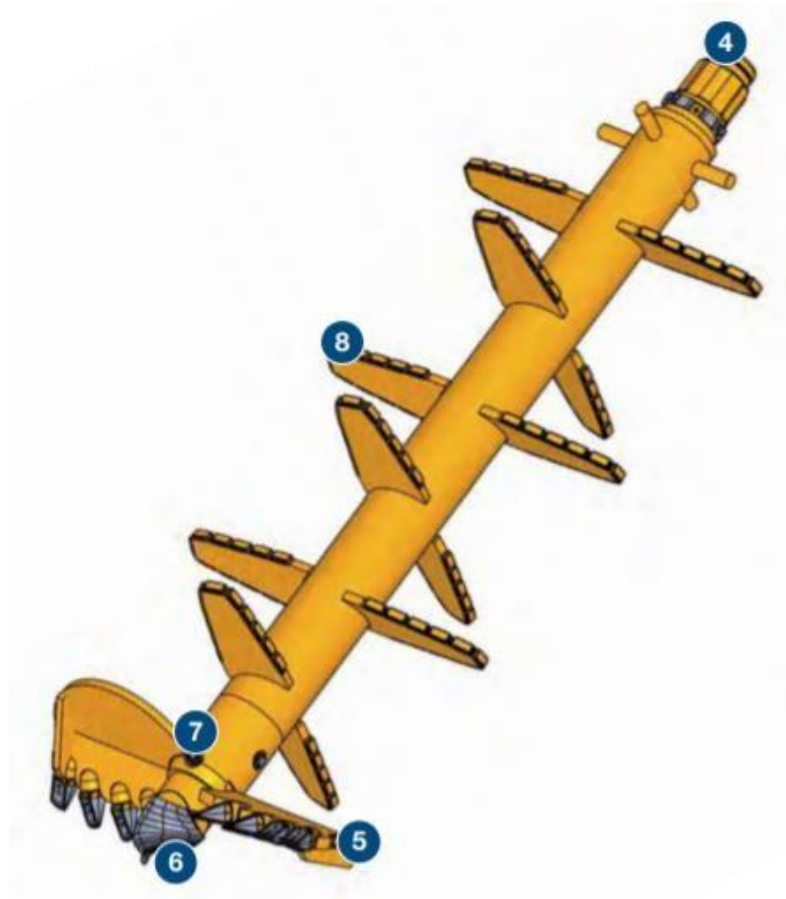


Ilustración 2.14 - Descripción en detalle de las piezas que realizan el soil mixing mediante el SCM [13].

- 4) Unión que conecta la herramienta de extensión con la línea de perforación.
- 5) Cuchillas que están proporcionadas con dientes planos, la cantidad de dientes planos varia según el tipo de suelo en el que se realice el soil mixing.
- 6) Broca que puede ser reemplazada debido al uso continuo.
- 7) Orificios donde sale el slurry, es posible ajustar el diámetro para variar las condiciones de velocidad y volumen según sean las especificaciones del proyecto.
- 8) Palas mezcladoras, se utiliza una gran cantidad de palas con la finalidad de romper y asegurar la mezcla del suelo con el aglutinante inyectado.



*Ilustración 2.15 - Sistema de perforación SCM [13].*

### **2.5.6.2. SCM-DH**

La Single Column Mixing Tool para Double Head Rotary (SCM- DH) es una versión mejorada del Single Column Mixing (SCM) presentado anteriormente, y que ha demostrado en muchas partes del mundo su eficiencia a la hora de ejecutar las columnas de soil mixng [13].

La gran ventaja que presenta el SCM- DH es que se usan dos componentes para la rotación inversa (una vez alcanzada la profundidad de diseño y comienza a retirarse la herramienta Imagen 2.17 de perforación) lo que genera un mejor nivel en cuanto al grado de homogenización del suelo con el aglomerante. Por consiguiente, se amplía el rango de usos, no solo es posible aplicarlo en columnas de suelos arenosos ahora también en suelos cohesivos [13].

Se detalla las componentes de la nueva herramienta, de igual forma que en el caso SCM.

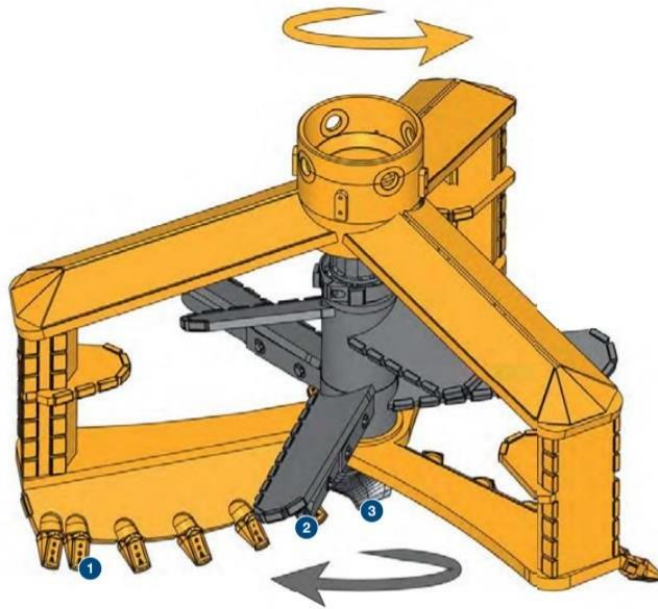


Ilustración 2.16 - Herramienta de perforación para SCM-DH [13].

- 1) Palas equipadas con dientes planos, al igual que en el modelo anterior estos dientes varían su cantidad dependiendo del tipo de suelos.
- 2) Toberas para el aglomerante, factores como el diámetro y el número de toberas se ajustan a las condiciones o requerimientos del suelo o condiciones del proyecto.
- 3) Broca de perforación, reemplazable.

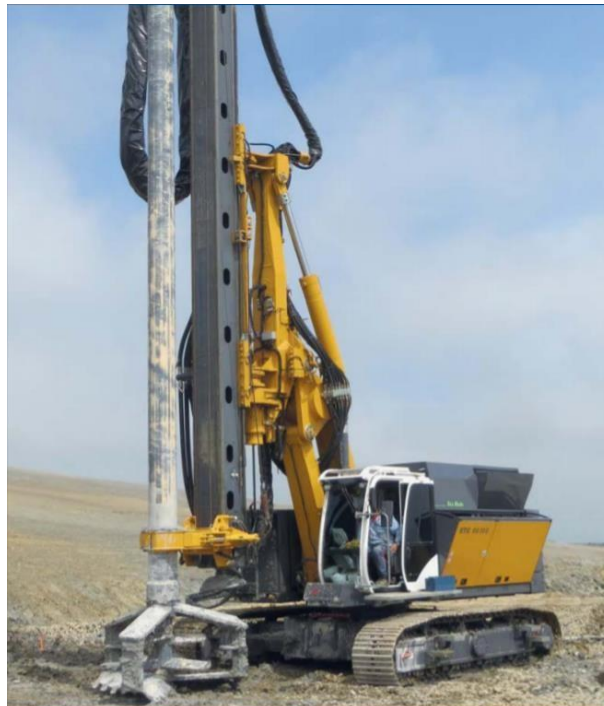


Ilustración 2.17 - Sistema de perforación SCM-DH [13].

## 2.5.7. Equipos

A continuación, se presenta el equipo auxiliar para llevar a cabo la elaboración del SCM y SCM-DH, esto es una recomendación hecha por Bauer [13] con la finalidad de hacer un proceso eficiente, de todas maneras, la opción de adaptarse a requerimientos específicos de casa obra siempre está disponible.

- Estación mezcladora de lechada: Para el SCM se recomienda una capacidad entre 15 y 40 [m<sup>3</sup>/h], mientras que en SCM-DH varía desde 30 a 80 [m<sup>3</sup>/h].
- Bomba de Suministro: Esta bomba regula SCM Bomba con control de frecuencia con control remoto; la capacidad depende del volumen de la columna y de la velocidad de mezcla (típicamente 200 - 600 [l/min] a 12 - 15 [bar]), para SCM-DH Bombas con control de frecuencia con control remoto; la capacidad total depende del volumen de la columna y de la velocidad de mezcla (típicamente 500 - 1500 [l/min] a 12 - 15 [bar]).
- Tanque de agitación: SCM en un rango de 3 – 6 [m<sup>3</sup>]. Entre 4 – 12 [m<sup>3</sup>] aproximadamente, para SCM-DH.
- Silos (almacenes): Para el cemento (además de un transportador de tornillos para mover el material a los distintos puntos).
- Retroexcavadora: Con la finalidad de realizar el mantenimiento a la plataforma de trabajo y controlar el flujo de retorno de material.
- Mangueras: Con la finalidad de transportar el material(lodo) desde el tanque de agitación hacia la máquina perforadora, según el modelo se utilizan rangos un poco distintos de diámetros, SCM comúnmente entre 1.5"-2.5", mientras que el SCM-DH entre 2" – 2.5" para las mangueras de lodos.

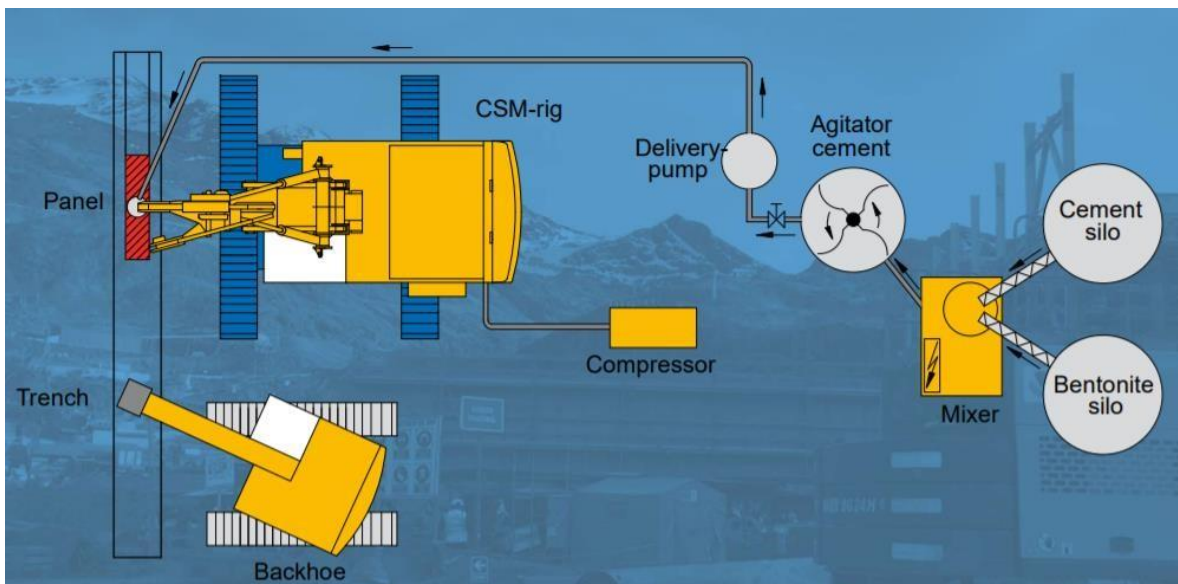


Ilustración 2.18 - Representación de los equipos, fuente: <https://incotecperu.pe/obras>.



Ilustración 2.19 - Equipos en obra para ejecutar método SCM, fuente: <https://incotecperu.pe/obras>.

## 2.6. Tipos de Mezcla

A continuación se describe los factores que influyen en las mezclas, ya sea el tipo de aglomerante a usar, la cantidad de agua, la razón agua cemento y la cantidad de aire inyectado a compresión.

### 2.6.1. Aglomerantes

La calidad de mejorar el suelo y el precio de implementar el método están directamente influenciados por el tipo y la cantidad de aglomerante utilizado. Los tipos de aglomerantes se definen según sea el tipo de suelo y/o el objetivo que se requiera desempeñar (ya sea mejorar el suelo, o solucionar problemas de filtraciones, entre otras opciones que se manejan con el DSM). Entre las características del suelo natural, la rigidez, la compacidad y el contenido de agua son habitualmente las más importantes en la determinación de la cantidad del material de aportación [1].

Hoy en día existen varios materiales de aportación utilizables, pero los que predominan son cal y cemento o la mezcla de los dos [1].

#### 2.6.1.1. Cal

El uso de la cal viva (CaO) como material de aportación, tiene su enfoque principal en la vía seca, esto se debe a la reacción que genera esta con el agua y minerales que presenta el suelo, esta reacción se caracteriza por una alta disipación de calor (se registraron temperaturas de hasta 70°C [1] ) con esto se disminuye el contenido de agua presente en el suelo natural, debido a la reacción se tiene un aumento en el límite plástico (LP) y una disminución del índice de plasticidad (IP) [1].

Se recomienda utilizar la cal en casos con presencia de arcillas con una humedad menor al 100% y con baja presencia de suelo orgánico. Goran [1] define la cantidad necesaria de aglomerante está en el rango entre 70 a 90 kilogramos por metro cúbico.

### 2.6.1.2. Cemento

El cemento como tal puede aplicarse en cualquier suelo, no tiene restricciones o reacciones con algún suelo en particular. En conjunto con aditivos puede utilizarse para trabajos en suelos con presencia de materia orgánica y alto porcentaje de agua.

Se debe considerar que según el tamaño de partículas del cemento es más pequeño, mejor será el resultado de la mezcla [1].

Se recomienda utilizar el mismo tipo de cemento para todo el proyecto, esto se debe a que influye en a la resistencia de a la columna de soil mixing.

La resistencia al corte aumenta con la disminución del límite líquido y está limitada con el contenido de agua del suelo natural (máx. 100 %). También el nivel de pH condiciona el incremento de la resistencia al corte; por debajo de pH igual a 5 el incremento es muy reducido.[1]

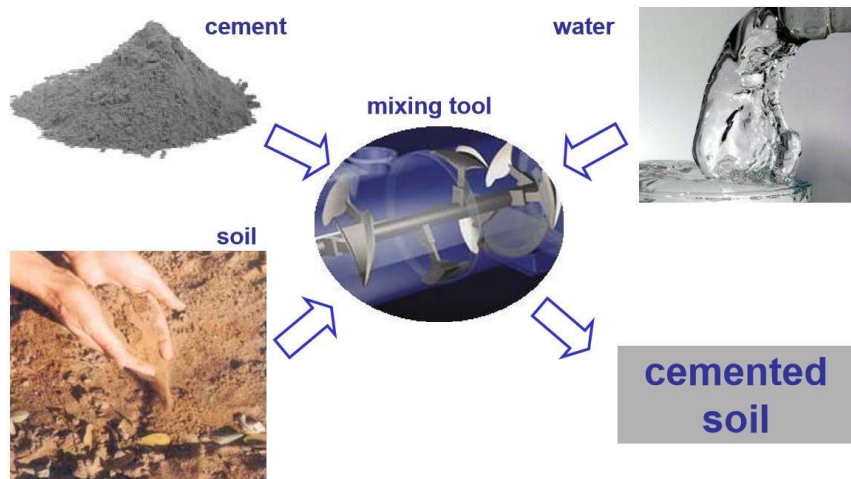


Ilustración 2.20 - Esquema sobre el soil mixng utilizando cemento.

### 2.6.1.3. Cal-Cemento

Esta mezcla de material es de los más usados en la actualidad. Se usan de acuerdo con razones de cal – cemento las cuales están definidas de la siguiente forma: 50/50, 25/75 o 75/25 % [1]. Estos valores dependen el tipo de suelo natural que se presente y de los objetivos que quieran lograrse. La relación cal cemento cuenta con las ventajas que proporciona la cal como es la disipación de calor que genera en el suelo que ya se mencionó anteriormente y la lenta reacción que esta genera con el suelo que es algo positivo para estabilizaciones de suelos, por esto último se recomienda usar razones con mayor cantidad de cal si el objetivo del proyecto/obra es estabilizar suelos.

### 2.6.2. Mezcla de agua

El agua recomendada y utilizada comúnmente para el método húmedo (wet method) es la potable. Sin embargo, el instituto de fundaciones profundas [7] aporato con casos de utilización agua proveniente del mar en sin que modifique la resistencia del suelo tratado.

### 2.6.3. Razón Agua/Cemento

Debe tener en consideración que para una misma cantidad de cemento si disminuimos el agua la resistencia que se obtendrá en el suelo será mayor a medida que se disminuye la proporción de

agua. Para el diseño debe considerarse el agua disponible en el mismo suelo a tratar. Además, esta agua debe ser suficiente para que se cumplan los procesos de mezclado del suelo nativo con el cemento e hidratación del cemento añadido.

Los casos donde es recomendable usar una baja relación a/c es en suelos arcillas de baja resistencia, pero con alto contenido de agua. La utilización de relaciones a/c mayores está asociado a suelos de grano grueso por sobre el nivel freático o en suelos arcillosos duros (con un grado de pre-consolidación) [7].

Bruce (2001) informa de que las proporciones de agua a aglutinante de las lechadas de cemento portland oscilan entre 0,5 y 2,5, y las más comunes entre 0,8 y 1,8.

#### **2.6.4. Inyección de Aire durante el mezclado**

Como se mencionó en 2.5.1. el aire es inyectado a baja presión mediante ductos provistos en la herramienta de perforación con la finalidad de ayudar en el proceso de mezclado en suelos de grano fino. La inyección debe configurarse con cuidado debido que puede inducir en aumentos de la presión de poros produciendo movimientos en el suelo [7].

### **2.7. Control de Calidad y Garantías de Calidad (QC/QA)**

El control de calidad y la garantía de calidad se obtienen de los registros de instalación de las columnas y de los resultados de las pruebas de verificación de laboratorio y de campo apropiadas. Cada columna está provista de un registro gráfico, que comprende: fecha y hora de ejecución, longitud del eje de la columna, tasas de penetración/retirada de la herramienta de mezclado, velocidad de mezclado, presión y tasa de flujo del lodo bombeado, consumo total de lodo por columna. [11]

#### **2.7.1. Criterios de Aceptación del Producto**

Es difícil establecer un conjunto de criterios que puedan utilizarse para cada aplicación de mezcla de suelos. El juicio de ingeniería debe desempeñar un papel en el establecimiento de los criterios de aceptación y en la determinación de si el suelo tratado satisface la intención del diseño. Si el suelo tratado no satisface ninguno de los criterios de aceptación, el Contratista debe notificar al Representante del Propietario, indicar por qué piensa que el suelo tratado no satisface los criterios y proponer medidas correctivas al Representante del Propietario para su aprobación. (7)

##### **2.7.1.1. Resistencia del Suelo Tratado**

Normalmente se verifica la resistencia a compresión no confinada del soil mixing a los 28 días (pueden existir variaciones según el uso del material aglomerantes o usos de aditivos adicionales) de esta forma evaluar la resistencia obtenida con la especificada en diseño. Para realizar los ensayos debe contactarse un laboratorio externo o ajeno a la empresa que realiza la obra y aprobado por el mandante del proyecto. En el manual para soil mixing [7] estableció criterios para la aceptación del suelo mejorado mediante el método:

- Sobre el 80% de las pruebas realizadas en los elementos de ensayo deben ser igual/mayor a la resistencia especificada en diseño.
- Sobre el 90% de las pruebas realizadas en el sitio del proyecto deben ser igual/mayor a la resistencia especificada en diseño.

- Para evitar un estrato débil, está prohibido aceptar resistencias menores a la especificada para los elementos que se encuentren adyacentes a dicha elevación.
- En el caso que un ensayo de resistencia sea inferior al exigido y se deba a una porción de suelo donde no se logró una mezcla homogénea el mandante tiene la opción de exigir una nueva muestra del mismo núcleo.

### **2.7.1.2 Permeabilidad del suelo tratado**

Queda definido para sistemas de columnas secantes impermeables (formación de un muro) y en proyectos de estabilización un promedio de conductividad hidráulica máxima de  $1 \times 10^{-6}$  [cm/seg] para sistemas de Deep mixing method, esto rige para ensayos de permeabilidad in situ como de laboratorio [7].

Para los casos temporales de impermeabilización no se especifican criterios de permeabilidad [7].

### **2.7.2. Pruebas Antes del Proceso Constructivo.**

La cantidad de estos ensayos dependen del tamaño asociado a la obra/proyecto, corresponden normalmente a sondajes exploratorios y ensayos al suelo natural ubicado en la zona de construcción. Los métodos asociados al soil mixing requieren de una amplia información del suelo donde se implementarán es por este motivo que se requieren estas pruebas previas para determinar la cantidad de material de aportación necesario en la mezcla.

Como indica Goran en su artículo [1] el tipo de material escogido y las mejoras que se pueden esperar dependen de las siguientes características del terreno:

- Nivel freático y Estratigráfica del sector.
- Peso específico.
- Rigidez y compacidad.
- Parámetros asociados a la resistencia al corte.
- Capacidad portante.
- Humedad.
- Índice de plasticidad.
- Limite Líquido.
- Contenido de minerales y materia orgánica.
- PH en el suelo y presencia sal y sulfatos.
- Consolidación e cada estrato.
- Presencia de obstáculos en la obra.

Se debe recomendar realizar el sistema de sondajes a una profundidad mayor que alcanzara la perforación para realizar los DSM en caso de que surja un inconveniente y los suelos mejorados alcancen una mayor profundidad. En cuanto a mediciones de las características hidrostáticas pueden utilizarse pozos de aguas subterráneas/o un sistema de medición piezométrico en casos donde exista filtración [7].

Un sistema utilizado comúnmente es tomar muestras y realizar ensayos SPT mediante muestras, las cuales proporcionan información básica para estimar los costos del proyecto, la información que se puede obtener es la siguiente:

- Análisis de Granulometría
- Límites de Atterberg
- Contenido de agua, materia orgánica y sulfato

- Pruebas de resistencia al corte.

Además, es viable complementar los SPT con ensayos de penetración de cono (CPT).

Por otra parte, pueden ensayarse pruebas de muestras en laboratorio como in situ, las primeras son importantes para analizar las características de los suelos presentes en el lugar e interpretar el comportamiento que puedan tener, para luego ensayar las proporciones de material agregado que deba incorporarse en  $\text{kg/m}^3$  para lograr los resultados deseados. Se vuelve a mencionar que estos ensayos se deben realizar para los distintos estratos que existan en el lugar donde se llevara a cabo la obra, como lo son los suelos heterogéneos.

Estos ensayos de laboratorio deben contrastarse con las pruebas in situ para lograr una mezcla/proporción de suelo-agregado más representativa, esto debido a que los resultados en laboratorio son un poco idealizados puesto que son hecho bajo mejores condiciones de mezcla.

Además, se recomienda dejar estipulados por contrato [7] una sección de ensayos de campo utilizando los parámetros de mezcla definidos de los ensayos de laboratorio e in situ, con la finalidad de instalar varios elementos DSM y de esta forma probar los distintos modelos/opciones de diseños de mezcla de la lechada y sus aglutinantes, también observar el procedimiento y los estándares de calidad propuestos para la obra.

Las secciones de pruebas de campo son habituales en los proyectos de soil mixing, estas varían dependiendo del tamaño de la obra, como se mencionó en el párrafo anterior tienen por finalidad demostrar el método de mezcla para cumplir con las exigencias del proyecto. Para obras con menos de  $23.000 \text{ m}^3$  se enfocan en aumentar el factor de aglutinante en las pruebas de campo y esperar que se desarrolle su resistencia en el tiempo todo esto para privilegiar la economía.

### **2.7.3 Control de Calidad**

Los registros del control de calidad deben ser considerado por parte de la empresa que realiza la obra de soil mixing a medida que esta se lleva a cabo, según la guía de soil mixing [7] se debe cumplir con un programa que incluya los siguientes puntos:

- Se verifique la ubicación geometría (según sistema de coordenadas del proyecto), la verticalidad de la herramienta de perforación, el ángulo asociado a la alineación con el suelo y que se cumpla con la profundidad especificada de cada elemento soil mixing.
- Vigilancia de los parámetros considerados para la mezcla de soil mixing (cambian de acuerdo con el tipo de mezcla). Estos parámetros deben estar bajo vigilancia de manera continua y registrarse (de forma electrónica) para cada elemento una vez sean ejecutados.
- Por último, el control y vigilancia del almacenamiento, mezcla, manejo, la entrega, calidad y cantidad de los materiales aglutinantes que se posean ya sea para el método seco o húmedo.

#### **2.7.3.1. Alineamiento Horizontal, Vertical y Profundidad**

En cuanto al alineamiento horizontal la empresa que llevara a cargo la ejecución del método DSM tiene la responsabilidad de documentar la ubicación de cada elemento que se ejecutara y el representante del mandante debe revisar que la información coincida entre los planos y los puntos marcados por topografía, de esta forma en caso de existir incongruencias corregir la ubicación para no afectar de forma negativa el proyecto.

Con respecto a la orientación vertical esta es controlada por el operador del equipo de perforación, de esta forma se acepta un margen de error del 1% de acuerdo con la posición de verticalidad original, además se considera dos direcciones perpendiculares de la vertical con relación al suelo [7].

En cuanto a la profundidad esta queda determinada de acuerdo con los elementos descritos en los planos del proyecto. Es útil que se realicen fiscalizaciones por parte del mandante para confirmar la profundidad a la que se ejecutó el elemento durante el proceso constructivo, ya que para elementos cortos las medidas correctivas requieren de tiempo y suelen ser costosas [7].

### **2.7.3.2. Parámetros de mezcla y aglomerantes.**

A continuación, se presentan términos asociados a la mezcla del suelo original con aglomerante que deben observarse en tiempo real [7]:

- Profundidad del elemento.
- Inclinación de la herramienta de perforación en dirección x e y.
- Velocidad de rotación (esta varía si se produce un cambio de estrato).
- Potencia del motor, consumo de energía y la presión asociada al aceite hidráulico.
- Tiempo que se realiza la mezcla a medida que se alcanzan distintas profundidades.
- Velocidades de penetración y retiro de la herramienta.

Los estándares de calidad respecto a los aglomerantes se enfocan en la calibración de los equipos de dosificación para lograr las mezclas especificadas por diseño. También ver las cantidades de material disponible diariamente (material aglomerante que se entregó en el sitio menos el almacenado y contrastarlo con el consumo registrado) [7] existe más de una forma de realizar ese registro diario.

Otro factor relevante que depende del tipo de método a emplear (wet/dry), en caso de usar el método seco (dry) el material aglomerante debe mantenerse seco desde la entrega y su posterior almacenamiento. Para el método húmedo (wet) debe verificarse que el equipo sea capaz de asegurar la mezcla requerida por diseño.

Otro factor que debe considerarse es la tasa/velocidad de inyección del aglomerante el cual se debe observar y verificar en tiempo real, en caso de hallar un factor aglutinante menor al especificado se debe volver a realizar la mezcla considerando una cantidad aglutinante adicional, además abarcando 1 metro adicional por sobre y debajo de la zona deficiente [7].

### **2.7.4. Garantías de Calidad**

Los métodos asociados al DSM para verificar las garantías de calidad consisten en métodos de muestreo y prueba para comprobar que se cumplen los criterios de diseño. Deben definirse con participación del mandante, los métodos a utilizar y la frecuencia con que estos se llevarán a cabo para ir cerciorándose que se cumplan las garantías, todo esto con relación en los criterios de aceptación (con criterios de aceptación establecidos al menos de forma preliminar) y de esta forma asegurar que posean un enfoque de acuerdo con la intención/objetivo del diseño final.

Una forma de verificar las garantías de calidad es por medio de una inspección visual, como su nombre lo dice consiste en sacar muestras del núcleo de elementos soil mixing evaluando criterios de calidad de mezcla. La inspección visual depende del juicio ingenieril para tomar muestras y que estas sean representativas de las zonas de la obra con la finalidad de evitar que se genere un sesgo de los datos. Se reitera la importancia del criterio del ingeniero al momento de escoger las muestras, tomar registros de elementos donde no se obtuvo una muestra homogénea/de calidad para el

elemento entero (con respecto a su profundidad) o el caso opuesto, seleccionar solo muestras que parecen bien ejecutadas podría influir de forma negativa en los resultados e indicar conceptos erróneos sobre las resistencias de dichos elementos.

Otra forma es usar métodos de muestreo continuo (continuous sampling) que se divide en dos ramos como es la extracción de núcleos rotatorios y extracción de núcleos sónicos, el primero consiste en extraer núcleos de los elementos soil mixing con un diámetro entre 46-89 milímetros, generándose una muestra alterada que se puede observar de manera continua, de igual forma puede utilizarse para ensayos de compresión no confinada y de esta forma obtener el resistencia del DSM, el sistema rotatorio otorga una desventaja a la muestra alterada que genera que no sea representativa para obtener valores asociados a la permeabilidad del soil mixing [7].

El método de extracción de núcleos sónicos tiene su uso principal en suelo mejorado asociado a resistencias bajas o con presencia de gran cantidad de rocas u otros desechos, en los cuales los métodos rotativos no logran muestras aceptables. Este método permite observar de forma continua la mezcla del aglomerante con el suelo, pero por otro lado la muestra no se utiliza para ensayos de permeabilidad o resistencia a compresión en el laboratorio [7].

Otra forma se ejecutar garantías de calidad es mediante los ensayos de compresión no confinada, estos deben quedar con sus especificaciones establecidas además de considerar resultados de las muestras húmedas y/o de la extracción de núcleos [7].

Al hablar de muestras húmedas se refiere a una porción de un elemento DSM recién instalado. El procedimiento de la toma de muestra consiste en bajar el artefacto de forma cilíndrica para tomar la muestra a una profundidad específica, se abre para tomar la muestra, posteriormente se cierra para evitar que esta se contamine y finalmente se lleva a la superficie. Se recomienda realizar varias muestras, estas se prueban a los 7 días para evaluar su resistencia a compresión no confinada y de esta forma predecir dicha resistencia a los 28 días [7].

Otro punto el cual deben existir garantías de calidad es la permeabilidad que se obtendrá de los elementos DSM, estas se obtienen de pruebas in situ y de laboratorio (muestras húmedas). Una vez más el juicio del ingeniero a cargo del diseño es preponderante, este se utiliza para comparar la permeabilidad obtenida en cada elemento de análisis, debido a que es probable que se obtenga una variación de valores dependiendo de las zonas donde se tomen las muestras además del tipo de procedimiento que se realice también afecta en los valores finales.

Además, el ingeniero a cargo por diversos motivos puede considerar invalidar las muestras húmedas para el análisis de permeabilidad, y solo considerar pruebas in situ, en este caso los valores entregados deberán considerarse de forma cualitativa. Esto se debe que los resultados in situ están influenciados por la permeabilidad que se presenta en las zonas de alrededor y el nivel freático que se presenta al momento del ensayo, entonces ese valor obtenido es muy sensible a cambios.[7]

## **2.8. Diseño Deep Soil Mixing**

Como se mencionó al comienzo del informe de título, las columnas de soil mixing pueden adquirir diversas formas/patronos distribuyendo las columnas individuales en la superficie, concretamente en este trabajo se utilizó el método de paneles basado en los estudios de Nguyen 2013 [17].



*Ilustración 2.21 - Sistema de Paneles de SM, unido mediante columnas secantes.[17]*

Como se mencionó en secciones anteriores, estos paneles son formados por columnas de SM unidas de forma secante, algunas características de estos paneles tienen principalmente que ver con mitigar el efecto de licuefacción. El documento [17] se refiere a las capacidades en cuanto a:

- Reducir tensiones de corte impuestas en el suelo encerrado por paneles, de esta forma se controla la generación excesiva de presiones de poros.
- Los paneles además disminuyen las deformaciones laterales y asentamientos en sentido vertical del suelo contenido.
- Funcionan además como una barrera que aísla las presiones de poros generadas en los suelos próximos a los paneles de SM.

Un caso conocido a nivel mundial donde se comprobó la efectividad del método SM aplicado en paneles fue el terremoto de Kobe de 1995 (Japón). La situación fue la siguiente, un hotel de 14 pisos, llamado Hotel Oriental fue construido con pilotes protegidos por paneles de DSM en una zona ubicada en un Muelle. El terremoto no generó grandes daños en las cimentaciones, ni tampoco hubo evidencias de licuación en el área interior de los paneles, no ocurrió de manera similar para las construcciones que se encontraban alrededor del Hotel los cuales experimentaron grandes deformaciones debido a la licuación en la zona [17].

### 2.8.1. Razón de área remplazada ( $A_r$ )

Como indica su nombre es una relación entre el área mejorada por columnas de DSM y el área total donde se llevará a cabo la mejora suelo natural.

$$A_r = \frac{A_c}{A} \quad (2.1)$$

Donde:

$A_r$  = Área de reemplazo.

$A_c$  = Área de las columnas de SM.

$A$  = Área total donde se realizará el mejoramiento de suelo.

Nguyen en su documento recomienda diseñar en el rango entre el 19% - 50% de área mejorada para sistemas de paneles [17].

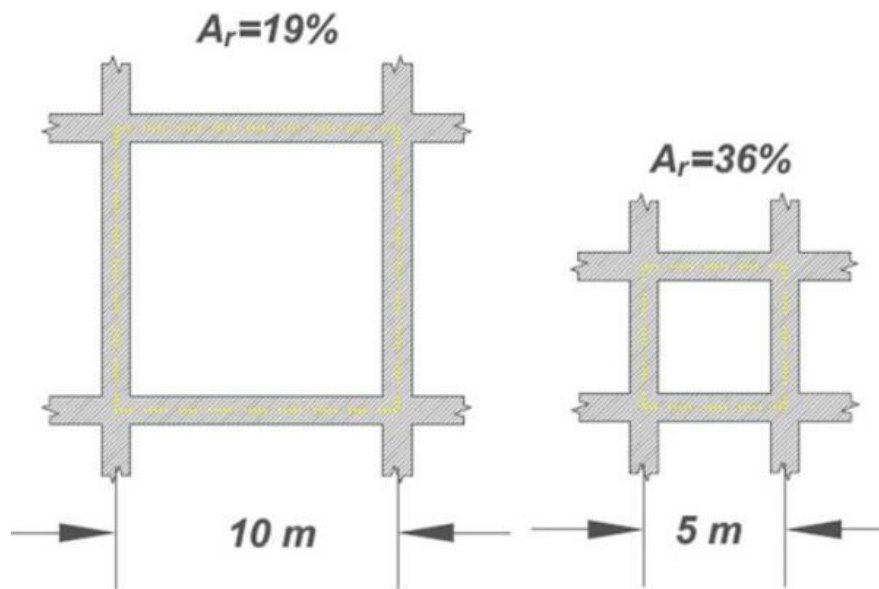


Ilustración 2.22 - Paneles dimensionados según su  $A_r$  [17].

Otros autores recomiendan valores mayores al 50% para el caso de zapatas aisladas [1].

Las dimensiones de los paneles pueden considerarse variable en cuanto a profundidad y longitud de los muros, pero el espesor se consideró fijo y con valor igual a 1 metro para todos los análisis, esta es una recomendación que señala el documento [17].

### 2.8.2. Coeficiente de Reducción del esfuerzo Cortante ( $r_d$ )

Como lo indica su nombre es un factor que disminuye el esfuerzo cortante y se aplica directamente al valor de sollicitación cíclica del suelo (CSR) reduciendo la sollicitación del suelo.

Este coeficiente de reducción de esfuerzos es considerado por el autor [17] y se forma a raíz de la sollicitación cíclica del suelo (CSR), aplicado en el caso sin la mejora por paneles de soil mixing y el término que considera la mejora realizada en el suelo.  
A continuación, se presentan la sollicitación cíclica del suelo para el caso no mejorado.

$$CSR_U = \frac{r_{s,U}}{\sigma'_v} = 0.65 \left( \frac{\alpha_{max,U}}{g} \right) \left( \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) r_{d,U} \quad (2.2)$$

También se define la sollicitación cíclica del suelo para el caso mejorado.

$$CSR_U = \frac{r_{s,U}}{\sigma'_v} = 0.65 \left( \frac{\alpha_{max,U}}{g} \right) \left( \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) r_{d,U} \quad (2.3)$$

Donde:

$r_s$  = Esfuerzo cortante cíclico medido en el suelo.

$\sigma'_v$  = Esfuerzo vertical efectivo.

$\sigma_v$  = Esfuerzo vertical total.

$a_{max}$  = Aceleración horizontal máxima en la superficie.

$r_d$  = Coeficiente de reducción del esfuerzo cortante

Nguyen realiza una posterior relación de ambos termino presentados, donde aparece este factor de reducción de corte y otro correspondiente a la relación de las aceleraciones máximas.

$$R_{CSR} = \frac{CSR_I}{CSR_U} = \left( \frac{a_{max,I}}{a_{max,U}} \right) \left( \frac{r_{d,I}}{r_{d,U}} \right) = R_{amax} R_{rd} \quad (2.4)$$

Donde:

$R_{amax}$  = Relación de aceleración máxima para los casos mejorados y no mejorados.

$R_{rd}$  = Factor de reducción de los esfuerzos cortantes.

Posteriormente Nguyen se enfocó en definir el factor de reducción para que tuviese el aporte de la rigidez de los muros, además de tener en consideración otro termino que expresara la incompatibilidad del esfuerzo de corte que arrojaron sus resultados con ensayos de elementos finitos.

$$R_{rd} = \text{Mín} \left\{ \frac{1}{G_r [A_r C_G \gamma_r + \frac{1}{G_r} (1 - A_r)]}, 1 \right\} \quad (2.5)$$

Donde:

$G_r$  = Razón módulo de corte ( $G_{DSM}/G_s$ ).

$C_G$  = Factor de corte Efectivo.

$\gamma_r$  = Distorsión relativa/ relación de deformación por corte.

De acuerdo con los resultados de los análisis de elementos finitos, Nguyen [17] presentó un gráfico del factor de reducción de corte versus la razón de reemplazo del terreno, para los siguientes casos de módulos de corte:  $G_r = 13.5$ , 20 y 50.

Se apreciaron valores similares de  $R_{rd}$  entre el caso  $G_r = 20$  y  $G_r = 50$ . Llegando a una reducción cercana a 50% para un área de reemplazo superior al 15% del terreno.

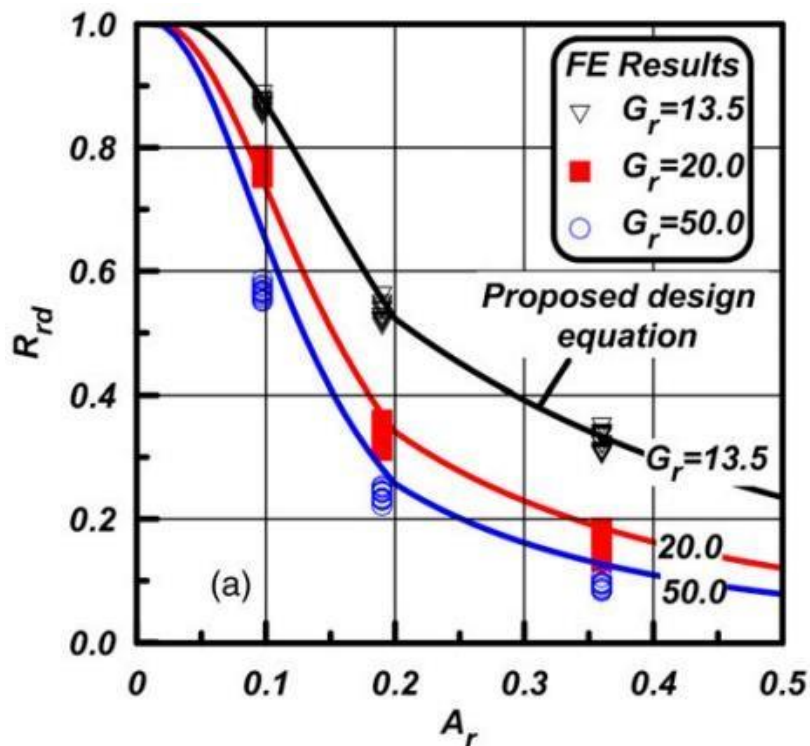


Ilustración 2.23 - Factor de reducción de corte versus área de reemplazo, para 3 casos de módulos de corte. [17]

### 2.8.3. Factor de Corte Efectivo ( $C_G$ )

Este término se considera como la rigidez al corte del sistema de paneles de DSM dividido entre la resistencia al corte que proporcionara el corte puro [17]. Además, Nguyen realizó análisis de elementos finitos pseudoestáticos para obtener una escala de valores que se presentan a continuación.

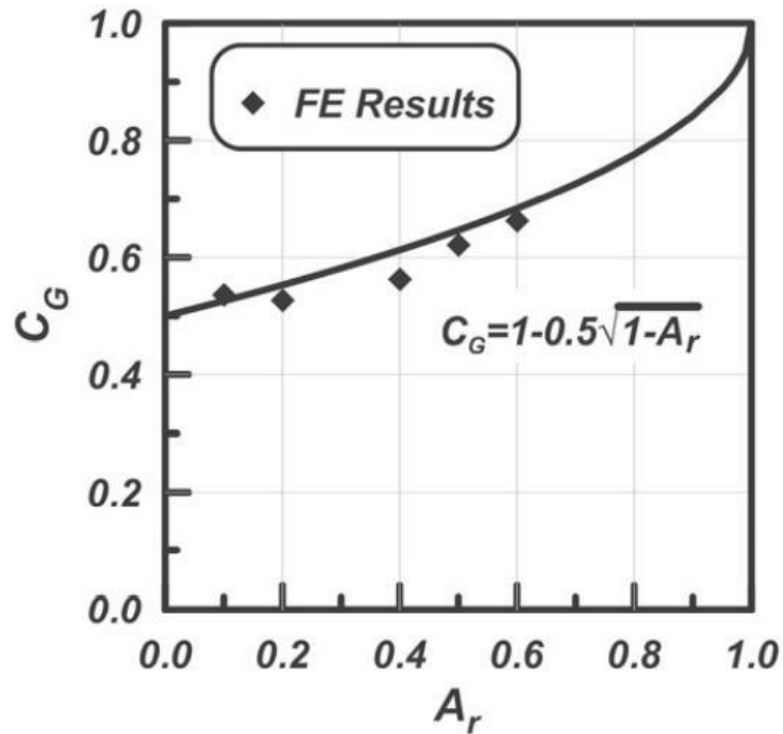


Ilustración 2.24 - factor de corte efectivo versus área mejorada. [17]

Como se apreció en la figura anterior este factor tiene un valor máximo igual a 1, esto se debió a la flexión y rotación de los muros de SM. Con esta gráfica, ajusto los valores a una expresión para definirlos de forma directa.

$$C_G = 1 - 0.5 \sqrt{1 - A_r} \quad (2.6)$$

Esta ecuación expresa valores ajustados mencionados anteriormente, con un rango entre 0.5 cuando el área reemplazada es 0% y un valor de 1 cuando se reemplaza el 100% de la superficie a tratar.[17]

#### 2.8.4. Distorsión Relativa / Relación de Deformación por Corte ( $\gamma_r$ )

Al considerarse este término en la obtención del factor de reducción de corte ( $R_{rd}$ ) expresa las diferencias de tensiones de corte que se desarrollan al interior de las paredes del sistema de paneles y el suelo encapsulado en ellos [17].

La distorsión relativa varía en función de la razón de módulo de corte ( $G_r$ ), el área de reemplazo ( $A_r$ ) y una relación entre la altura del muro de SM ( $H$ ) y el espaciado entre muros/rejillas ( $S$ ) [17]. Nguyen de sus ensayos obtuvo valores de  $\gamma_r$  en un rango de 10-50 para  $G_r$  y con áreas de reemplazo ( $A_r$ ) entre 19% hasta 50%, estos pueden estimarse mediante:

$$\gamma_r = \left[ 1 - (1 - A_r)^{1.3} \left( \frac{G_r - 1}{185} \right)^{0.4} \right] \min \left( \frac{H}{S}, 1 \right) \quad (2.7)$$

Esta expresión es igual a 1 cuando el área de reemplazo equivale al 100%, esto quiere decir que en ese valor el suelo se deforma igual que los paneles, entonces al deformarse poco, es poco probable que alcance a licuar.[17]

A continuación, se presenta un gráfico de los resultados obtenidos por Nguyen, para casos con  $G_r$  igual a 13.5, 20 y 50.

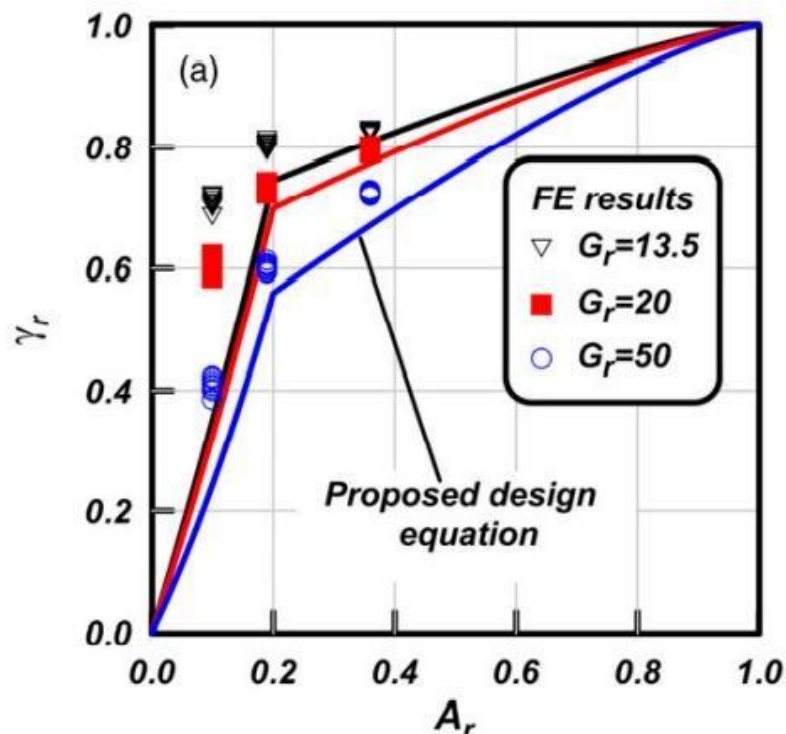


Ilustración 2.25 - Distorsión relativa versus área de reemplazo, para casos de estudio  $G_r = 13.5, 20$  y  $50$ .

## 2.9. Columnas de Grava

### 2.9.1. Prologo

Se abarca el tema de columnas de gravas en términos generales, con la finalidad que se tengan las nociones mínimas requeridas para ser comparada con el método de estudio. Este capítulo está basado en un informe técnico elaborado por Aldo Guzmán y Juan Manuel Fernández [18], el cual explica de manera clara los sistemas elaborados por columnas de grava, enfocado en la mitigación de la licuación que es el enfoque que aplicaremos el método Deep Soil Mixing.

## **2.9.2. Clasificación**

Se introducen los tipos de columnas de grava basados en el sistema de ejecución en obra, los cuales son los más comunes (no los únicos existentes) en Sudamérica.

### **2.9.2.1. Vibradores Profundos**

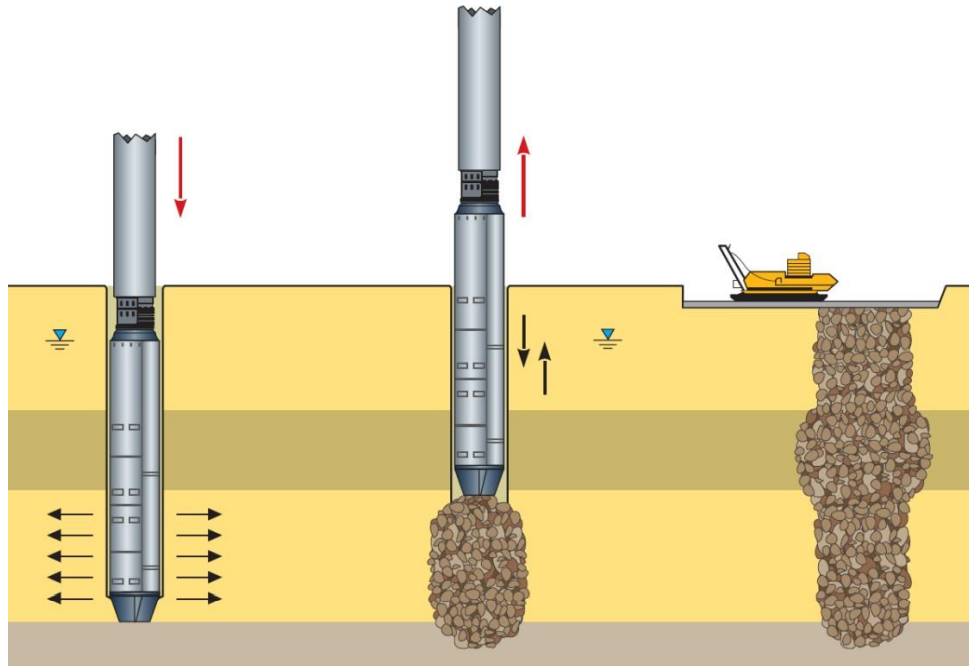
Este tipo de ejecución consiste en el uso de un martillo en la parte inferior del sistema conectado a través de un elemento cilíndrico, todo el sistema funciona con energía obtenida de un motor (hidráulico/eléctrico). Este tipo posee dos variantes.

#### **2.9.2.1.1. Top Feed**

Esta alternativa consiste en la aportación de material (grava) desde la superficie una vez el vibrador haya alcanzado la profundidad requerida mediante la vibración, su peso propio y el aporte del agua con un gran caudal. Adicional este vibrador va unido a un sistema de tubos que puede extenderse (para lograr los requerimientos de profundidad) esto se posiciona de forma vertical a través de una grúa. Cuando comienza a alimentarse la columna con grava el vibrador se extrae lentamente, específicamente el movimiento consiste en subir y bajar, con el objetivo de que la grava que esta relleno la columna pase por el espacio anular y el vibrador la compacte a medida que este mismo se retira. Este método es también es llamado vía húmeda debido a la participación del agua en el proceso de penetrar el suelo. [17]

#### **2.9.2.1.2. Bottom Feed**

Al igual que el método anterior, este sistema también utiliza un martillo vibrador enlazado a un sistema de tubos metálicos verticales, que pueden extenderse según los requerimientos (de profundidad), pero una diferencia es que bottom feed trae un tubo de contención de grava, para añadir esta desde una tolva en la superficie hasta el extremo inferior del vibrador. A medida que el vibrador se introduce en el terreno es apoyado/complementado por aire comprimido, pero sin considerar la extracción de material desde el suelo. Debido que el material es depositado directamente desde el inferior de la columna hacia arriba, el equipo/sistema cuenta con un sistema que presuriza el interior del tubo con aire comprimido, con la finalidad que no se genere sifonaje de la arena. Este sistema toma relevancia a la hora de ser ejecutado para el tratamiento de sistemas licuables, debido que se logran columnas con baja permeabilidad (al no ingresar material fino que se encuentra alrededor de la columna).[17]



*Ilustración 2.26 - representación etapas de vibrosustitución.[19]*

A diferencia del método anterior, este cambia el uso de agua por aire comprimido, por lo que es también llamado vía seca.

Otro comportamiento que se aprecia en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** es el aumento de diámetro debido a un estrato con menor densidad.

### **2.9.2.2. Columnas/Pilas de Grava o agregado compactado.**

Este sistema se basa en realizar una perforación de un pozo sin revestimiento (sistema que divide entre el suelo natural y la perforación de forma temporal), una vez se alcanza la profundidad requerida se rellena con grava, la cuales compactada mediante un martillo hidráulico y una masa.

Este método logra resultados aceptables, pero en suelos licuables es complicado realizarlo debido que requiero una perforación estable sin encamisado.

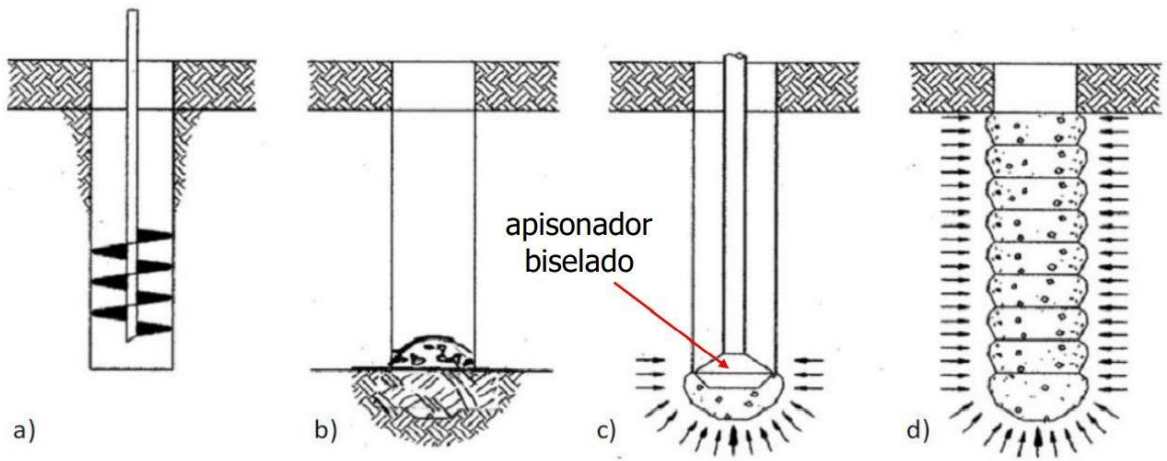


Ilustración 2.27 - Etapas de instalación, columnas de grava compactada. [19]



Ilustración 2.28 - Columnas de grava compactada, sistema RAP. [19]

### 2.9.3. Avances sobre el Método de Columnas de Grava.

Como se mencionó al comienzo del capítulo sobre columnas de grava, estas tienen un efecto el cual consiste en mitigar el efecto de licuación de los suelos, esto abordado desde 3 aristas como lo son: la densificación, rigidización y el sistema de drenaje.

En el cálculo se consideró despreciable el aporte como sistema de drenaje de las columnas de grava. Pero se tuvo presente que es un hecho que las columnas de grava presentan mayor permeabilidad que el terreno natural [18], y actúan como drenes verticales que disipan presiones de poro durante un evento sísmico.

#### 2.9.3.1. Densificación.

Consiste en la densificación del suelo circundante a las columnas de grava, estos suelos deben ser similares al tipo arenoso con bajo porcentaje de finos (menor al 20% respectivamente). [19]

En caso de que el porcentaje de finos sea mayor a 12-15% esto significara que no será posible una densificación a través de métodos de vibración. Para estos casos con porcentajes de finos mencionados anteriormente se recomienda el uso de mechas drenantes antes de instalar las columnas de grava, de esta forma es posible llevar a cabo una densificación de arenas limosas. [18]

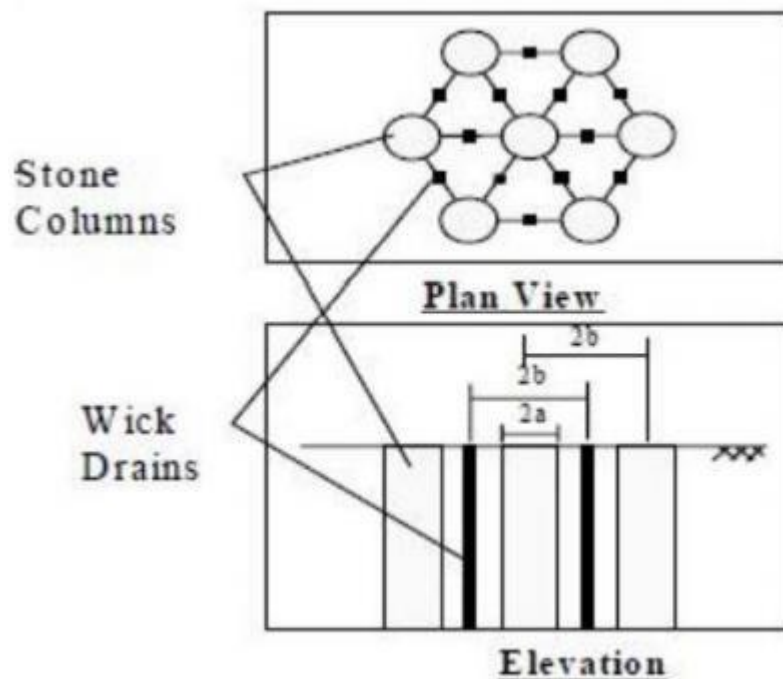


Ilustración 2.29 - Mechas drenantes aplicadas en sistemas de columnas de grava.

La densificación generada por las columnas de grava se representa en un aumento de la razón de resistencia cíclica (CRR), Ben Salem et al. (2017) [31] presenta resultados para 24 casos de estudio en 7 países diferentes.

Donde se realizaron ensayos SPT (31 casos) y CPT (33 casos). Estos ensayos se realizaron al comienzo y al finalizar la densificación del terreno, mediante sistemas de columnas de grava, con la finalidad de estimar de forma anticipada el aumento de la resistencia que se obtendrá, en dicho

método. A continuación, se presenta el gráfico asociado al caso de estudio de esta memoria de titulación, el cual corresponde al ensayo CPT.

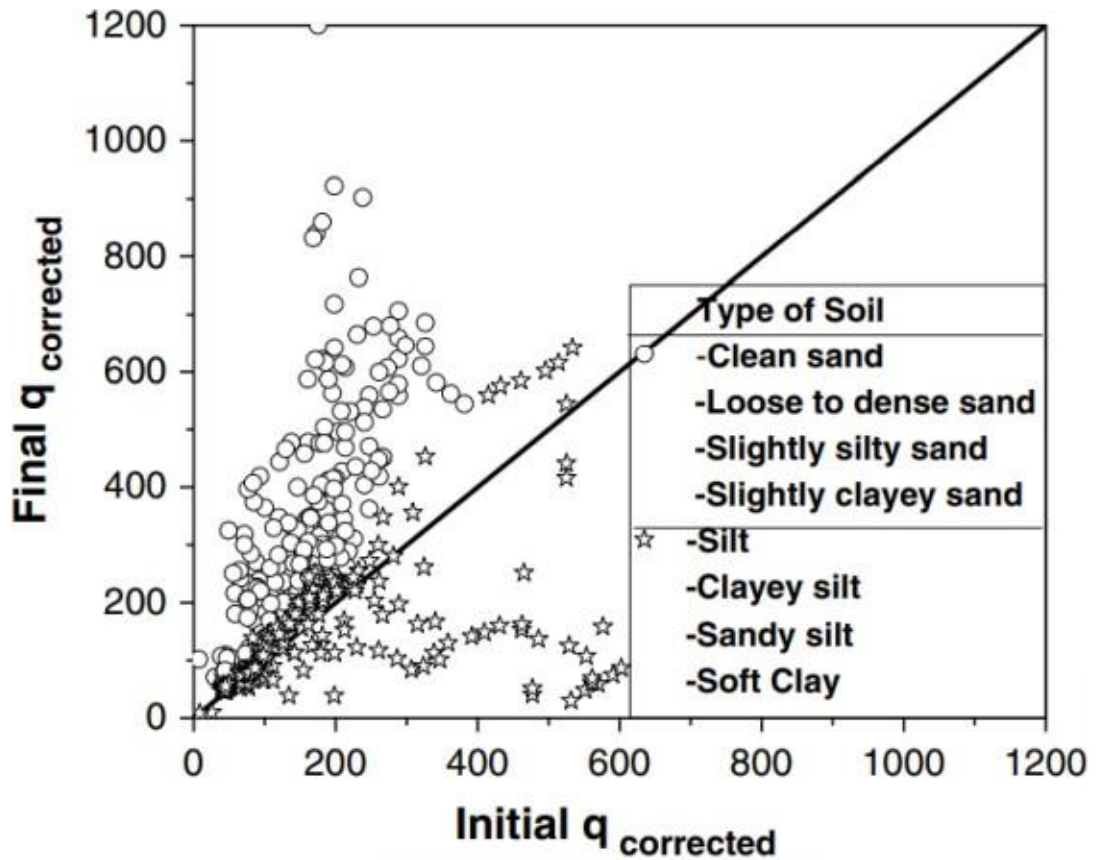


Ilustración 2.30 - Variación inicial y final de valores de resistencia en punta, obtenidas por ensayos CPT.[31]

### 2.9.3.2. Rigidización.

Otro efecto generado por las columnas de grava es la rigidización del suelo, esto bajo el supuesto que las columnas al ser más rígida que el suelo mismo toman una mayor carga/solicitud, de esta forma reducir la razón de esfuerzo cíclico (CSR). Investigaciones publicadas recientemente han demostrado que las metodologías de cálculo tradicionales basadas en la compatibilidad de deformaciones entre el suelo y las columnas sobreestimarían la reducción del corte real en el suelo.

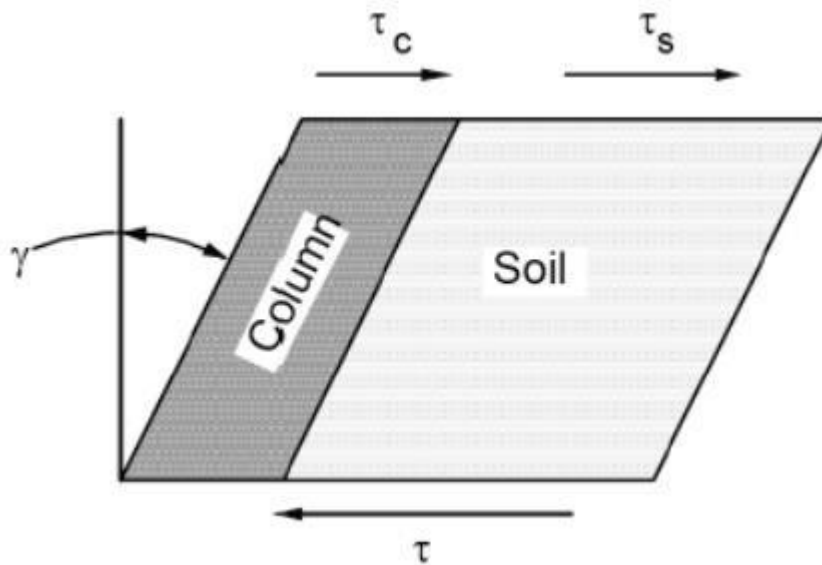


Ilustración 2.31 - Teoría de la compatibilidad de deformaciones a corte para calcular la reducción de CSR.[18]

Artículos publicados en el último tiempo como Rayamajhi [32] han criticado el método tradicional descrito por Baez [33] y Priebe [34]. Estos documentos afirman que el efecto producido por al rigidización es bastante menor al obtenido por el método hasta ese momento convencional. Esto se presenta de forma gráfica a continuación [31].

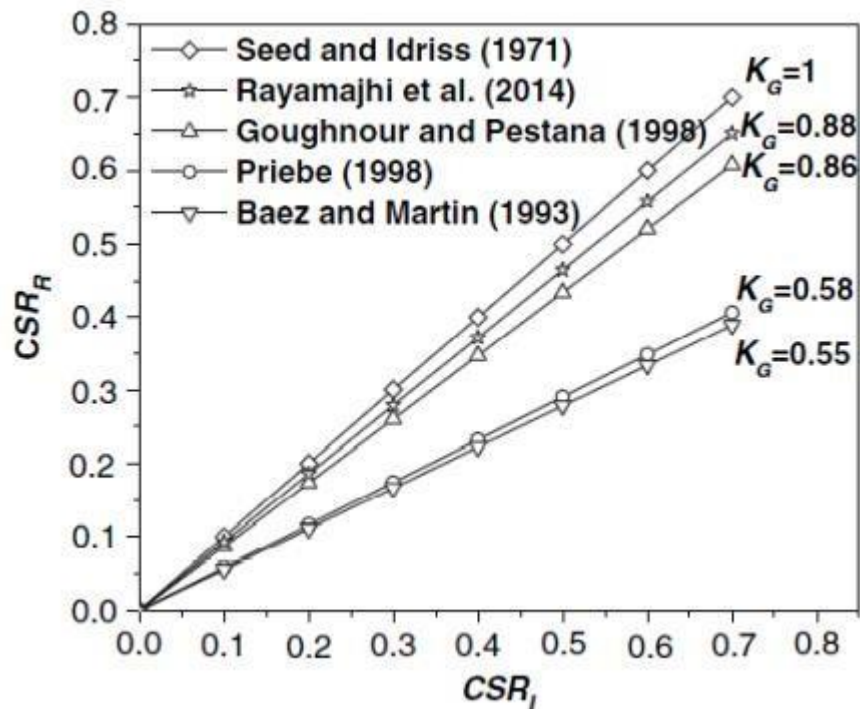


Ilustración 2.32 - Reducción de CSR mediante distintos para columnas de grava. [31]

Este gráfico fue un punto de inflexión para el cálculo de la reducción de la razón de esfuerzo cíclico en columnas de grava, en donde se originaron nuevas propuestas para la estimación de esta, una de ellas fue la presentada por Rayamajhi [32].

➤ **Rayamajhi et al. [32]**

Este trabajo de título se enfocó en procedimientos a partir de ensayos CPT, por consiguiente, la metodología que se presentara a continuación siguió esa misma línea.

$$K_G = R_{rd} = \frac{1}{G_r [A_r \gamma_r C_G + \frac{(1 - A_r)}{G_r}]} \leq 1 \quad (2.8)$$

Donde:

$C_G$  = Factor geométrico, se considera 1 para columnas circulares.

$G_r$  = Razón de módulo de corte entre columnas de grava y suelo.

$A_r$  = Área de reemplazo.

$\gamma_r$  = Razón de deformación de corte entre las columnas y el suelo entorno a la columna.

$$\gamma_r = 1.04 (G_r)^{-0.65} - 0.04 \leq 1 \quad (2.9)$$

Para finalizar el factor de reducción de corte se aplica en la razón de esfuerzo cíclico (CSR).

$$K_G = \frac{CSR_R}{CSR_I} \quad (2.10)$$

Donde:

$CSR_R$  = sollicitación cíclica del suelo reforzada.

$CSR_I$  = sollicitación cíclica del suelo inicial.

La obtención de CSR se detalla en la sección de evaluación del potencial de licuación. A continuación, se presenta un gráfico donde se compara el factor de reducción según el porcentaje de área mejorada y el módulo de corte.

Rayamajhi et al. (2014)

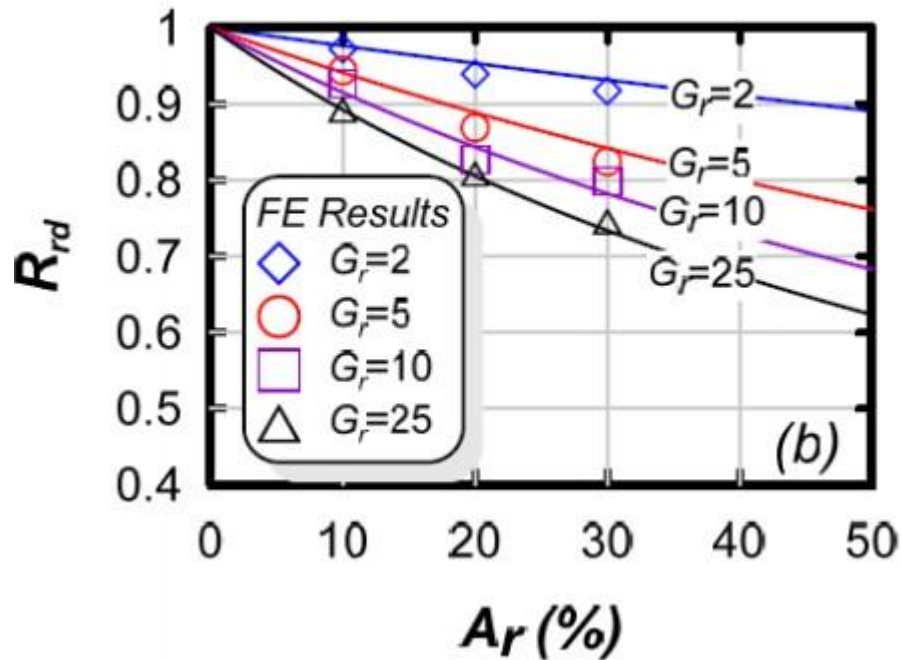


Ilustración 2.33 - Comportamiento del módulo de corte según el área mejorada y la razón del módulo de corte. [19]

## 2.10. Evaluación del potencial de Licuación en Suelos.

Esta sección abarca la metodología enfocada principalmente en los ensayos de cono de penetración (CPT), ensayos que se realizaron en el sector de estudio, ubicado en calle 5 oriente entre 1 y 2 norte, en la ciudad de viña del mar, región de Valparaíso.

A partir de estos ensayos se obtuvo el diseño del DMM. En la primera parte se hablará a cerca de valores de susceptibilidad de la licuación, posteriormente se evaluará el potencial de licuación y cerrar con los parámetros de vulnerabilidad de licuación.

### 2.10.1. Factores de susceptibilidad de licuación.

Estos factores son utilizados para determinar si el suelo posee la característica de entrar o no en estado de licuación, con finalidad de obtener una estimación o un dato preliminar de lo que pueda ocurrir, luego de obtener estos índices existen otros métodos que determinan que condiciones deben suceder para que licue o no el suelo en observación.

Dos parámetros serna utilizados en este trabajo de título para evaluar susceptibilidad: El índice de plasticidad (IP) y el índice de comportamiento de suelos ( $I_c$ )

#### 2.10.1.1. Índice de Plasticidad (IP)

Cuando los suelos contienen gran cantidad de material fino, los límites de Atterberg son una opción para determinar el índice de plasticidad, en estos suelos de capacidad de licuar está determinada por la plasticidad que puedan alcanzar. [21]

El índice de plasticidad se obtiene mediante la diferencia entre el límite plástico (LP) y límite líquido (LL).

$$IP = LP - LL \quad (2.11)$$

Suelos con índice de plasticidad alto corresponden normalmente a ser arcillas, un IP bajo corresponden a limos y sin plasticidad se ubican los suelos granulares [21].

Natalia Guerrero en su trabajo de titulación [21], recomienda utilizar el siguiente criterio para evaluar la susceptibilidad de suelos a licuar, considerando además la razón de humedad ( $w_c$ ).

$$Si \ IP < 12 \wedge \frac{m_c}{LL} > 0.85 \text{ Susceptible a licuar} \quad (2.12)$$

$$Si \ IP > 12 \wedge \frac{m_c}{LL} > 0.85 \text{ Sistemáticamente más resistente a Licuar} \quad (2.13)$$

$$Si \ IP > 12 \wedge \frac{m_c}{LL} > 0.85 \text{ Sistemáticamente más resistente a Licuar} \quad (2.14)$$

Como se mencionó anteriormente estos índices solo deben considerarse como un indicador de susceptibilidad, ya que las pruebas realizadas en laboratorio pueden variar durante el traslado de estas [21].

### 2.10.1.2. Indico de comportamiento del suelo ( $I_c$ ).

Este método puede utilizarse cuando se realizan ensayos de penetración de cono (CPT) en el lugar, consiste en utilizar un criterio para estratos de suelos que posean un  $I_c < 2.6$  entonces se puede asumir que la capa no es licuable, sobre este valor el método interpreta que existe una plasticidad muy alta. [21]

### 2.10.2. Evaluación del Potencial de licuación

El tema de Deep soil mixing será complementado con el método simplificado propuesto por Seed & Idriss [22], en el año 1971, con el paso del tiempo hasta la actualidad el método se vio modificado, debido al trabajo realizado por investigadores del área de la geotecnia. Este método se basa en fórmulas empíricas, de esta forma se permitió un análisis y evaluación de la probabilidad de licuación para los estratos presentes en la obra de 5 oriente y 1 norte.

La información base del método se obtiene a partir de parámetros de algún ensayo realizado en la zona, para este taller de título y caso específico se utilizaron pruebas de penetración de cono (CPT) y además caracterizar la zona sobre su comportamiento en caso de existir un sismo.

El método plantea un coeficiente o factor de seguridad, el cual vincula la resistencia del terreno versus la acción del sismo en el mismo. El coeficiente resultante no debe ser menor a 1.

$$F.S. = \frac{CRR}{CSR} = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} MSF K_{\sigma} K_a \quad (2.15)$$

Donde:

F.S. = Factor de seguridad.

CRR = Resistencia cíclica del suelo.

CSR = Solicitación cíclica del suelo.

CRR<sub>7.5</sub> = Resistencia cíclica del suelo para un sismo de 7.5.

MSF = Factor de escala de magnitud del sismo.

K<sub>σ</sub> = Factor de corrección por confinamiento.

K<sub>a</sub> = Factor de corrección por corte.

### 2.10.2.1. Solicitación Cíclica del Suelo (CSR).

Este valor adimensional, es una relación entre la tensión traducida a través del sismo enfrentada con la tensión efectiva a una cierta profundidad [23].

Queda representado por la siguiente expresión [21]:

$$CSR = \frac{r_h}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \frac{a_{max} \sigma_{v0}}{g \sigma'_{v0}} r_d \quad (2.16)$$

Donde:

r<sub>h</sub> = Valor medio esfuerzo cortante [KPa].

σ<sub>v0</sub> = Tensión total vertical a la profundidad del estrato a estudiar [KPa].

σ'<sub>v0</sub> = Tensión vertical efectiva a la profundidad del estrato [KPa].

a<sub>max</sub> = Aceleración máxima horizontal generada [m/s<sup>2</sup>].

r<sub>d</sub> = Valor del coeficiente reductor de tensiones cortantes en función de la profundidad.

Los términos que aparecen en la expresión de la solicitación cíclica del suelo serán descritos a continuación, que además son los empleados en caso de estudio.

#### ➤ Youd et al. (2001) [23]

El coeficiente reductor de tensiones cortantes (r<sub>d</sub>) proporciona un valor para las tensiones de corte, que ocurren en el terreno, asumiendo que el comportamiento de una columna rígida.

$$r_d = \frac{(1 - 0.4113 z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753 z^{1.5})}{(1 + 0.4177 z^{0.5} + 0.05729 z + 0.006205 z^{1.5} + 0.001210 z^2)} \quad (2.17)$$

Donde:

$z$  = Profundidad desde la superficie del suelo [m].

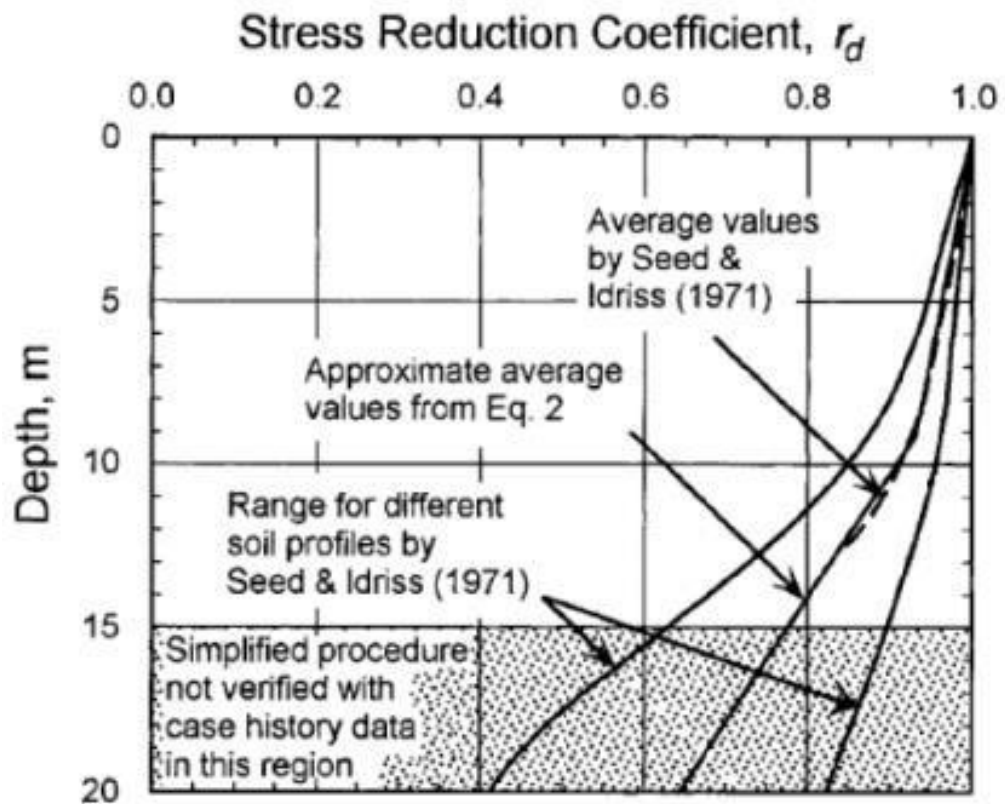


Ilustración 2.34 - coeficiente de reducción de tensiones ( $r_d$ ). [24]

➤ **Boulanger & Idriss (2014) [24]**

La publicación del 2001 [24] ya se menciona una relación entre el coeficiente reductor de tensiones cortantes ( $r_d$ ) y la magnitud del sismo ( $M_w$ ).

$$r_d = \exp(a(z)) + Q(z) M_w \quad (2.18)$$

$$a(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \quad (2.19)$$

$$Q(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.78} + 5.142\right) \quad (2.20)$$

Donde:

$z$  = Profundidad desde la superficie [m].

$M_w$  = magnitud del sismo.

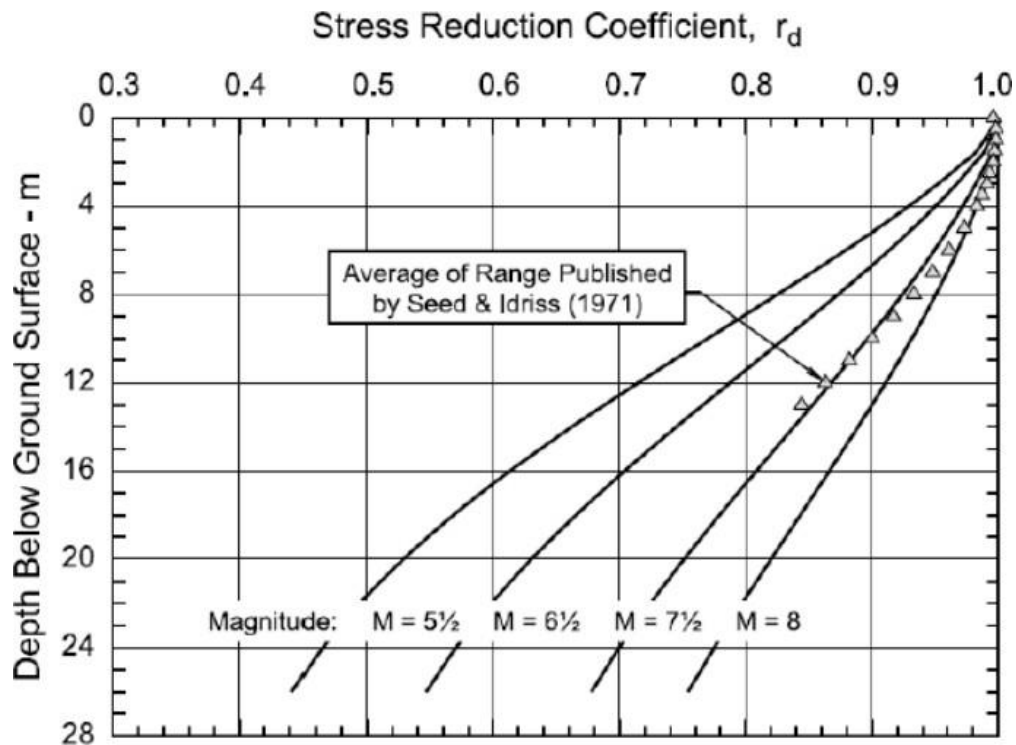


Ilustración 2.35 - Coeficiente reductor de tensiones según la magnitud del sismo y la profundidad del suelo. [25]

A medida que aumenta la profundidad del suelo, se obtienen valores del coeficiente reducción de tensiones ( $r_d$ ) con menor precisión. [20]

### 2.10.2.2. Resistencia Cíclica del Suelo (CRR)

La resistencia cíclica del suelo es un valor adimensional que tiene como consideración la resistencia al corte del terreno. Para la obtención de los parámetros iniciales se puede utilizar ensayos de laboratorio y/o mediciones en terreno. En cuanto a mediciones en terreno en Chile es muy utilizados el ensayo de penetración estándar (SPT), ensayo de penetración de cono (CPT) y análisis de microtemores de ReMi (ReMi) [20].

Para el caso de estudio se trabajó con mediciones en terreno, y se utilizaron ensayos CPT, esto se debe que no es recomendable usar SPT cuando el suelo tiene un contenido considerable de arena, por la capacidad de extraer una muestra sin que se altere.

$$CRR = CRR_{7.5} MSF K_{\sigma} K_{\alpha} \quad (2.21)$$

### 2.10.2.2.1 Ensayo de Penetración de Cono (CPT).

Una ventaja del ensayo realizar ensayos CPT es que se pueden aplicar en variados tipos de suelo. Es cierto que en sus inicios estuvo enfocado en suelos blandos, con las tecnologías que consisten en conos más robustos y de mayor dimensión, los CPT pueden aplicarse en suelos rígidos, con registros incluso en roca blanda [26].

Tabla 2.2 - Ventajas y desventajas del ensayo CPT. [26]

Ventajas	Desventajas
Sistema rápido y continuo	Inversión de capital relativamente alta
Alta productividad	Los operadores deben ser capacitados
Resultados fiables para la interpretación	No existe extracción de muestra de suelo
Datos repetibles y fiables (no depende del operador)	Puede existir limitaciones en caso de estratos de cemento/grava

El CPT consiste en introducir un sistema de varillas (dependiendo de la profundidad requerida) al interior del suelo, en la punta inferior del sistema existe una terminación de forma cónica, el sistema en conjunto realiza mediciones de forma continua esto permite obtener un perfil estratigráfico detallado del suelo. Los parámetros obtenidos a través de este ensayo son los siguientes [20]:

- Resistencia de punta ( $q_c$ ) se obtiene de la penetración realizada por el cono.
- La resistencia a fricción ( $f_s$ ) proporcionada por el fuste de las varillas.
- También la presión de poros ( $u_2$ ) que varía con la profundidad.

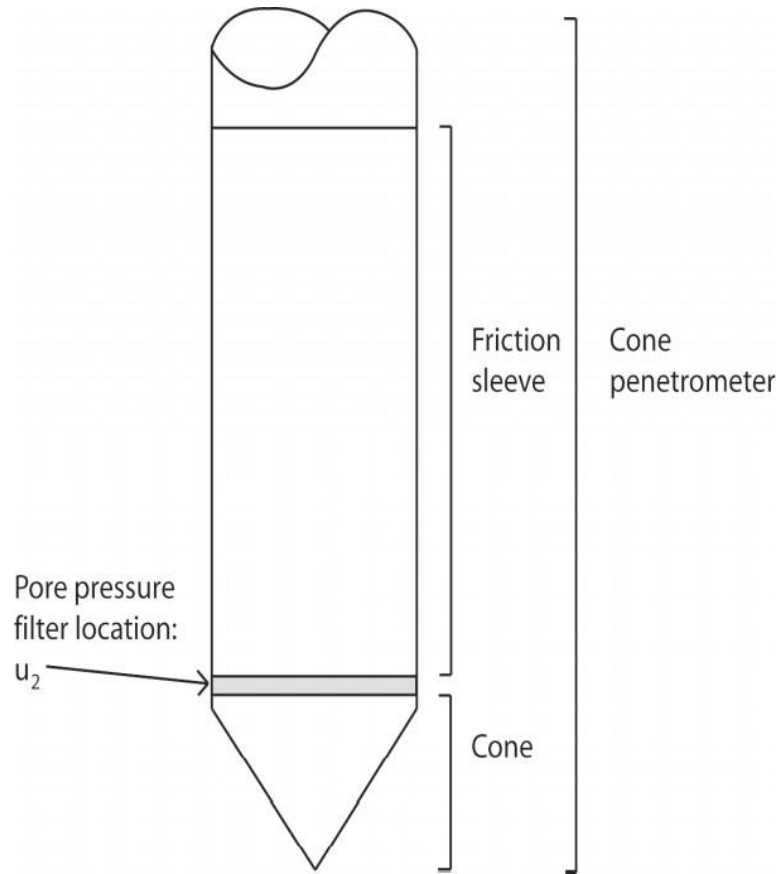


Ilustración 2.36 - Detalle grafico del sistema CPT. [25]

A continuación, se presenta la expresión para obtener la resistencia del cono ( $q_t$ ) la cual tiene un término asociado al aporte del agua.

$$q_t = q_c + u_2 (1 - a) \quad (2.22)$$

El parámetro  $a$  es un factor asociado a la relación de área neta, determinado por calibración del instrumento, con valores típicos entre 0.7 y 0.85. En caso de que el tipo de suelo se clasifique como arena se puede realizar la aproximación que  $q_c = q_t$  [20].

El índice de comportamiento queda definido como:

$$I_c = ((3.47 - \log(Q_t))^2 + (\log(F_r) + 1.22)^2)^{0.5} \quad (2.23)$$

$$Q_t = \left( \frac{q_t - \sigma_{v0}}{P_a} \right) \left( \frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad (2.24)$$

$$F_r = \left( \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \right) 100 \quad (2.25)$$

Donde:

$Q_t$  = Resistencia a la penetración del cono normalizada.

$F_r$  = Resistencia del fuste a la fricción normalizada.

Lo siguiente es presentar correcciones de algunos autores para la obtención de la resistencia cíclica del suelo (CRR).

➤ **Youd et al. (2001)** [24]

El procedimiento tiene su origen desde el método propuesto por Robertson [21], el cual se trabaja con parámetros normalizados de arenas limpias ( $q_{c1N}$ )<sub>CS</sub>, definido por la siguiente expresión.

$$(q_{c1N})_{CS} = K_c q_{c1N} \quad (2.26)$$

$$q_{c1N} = C_q \left( \frac{q_c}{P_a} \right) \quad (2.27)$$

$$C_q = \left( \frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \leq 1.7 \quad (2.28)$$

Donde:

$q_{c1N}$  = resistencia en punta corregida por confinamiento

$C_q$  = factor de normalización por presión de confinamiento.

Para encontrar el valor del término  $n$ , debe realizarse mediante un proceso iterativo, el cual es descrito a continuación. [21]

- Se debe evaluar el índice de comportamiento del suelo ( $I_c$ ) con la ecuación ( 2.23) y un factor de normalización por presión de confinamiento ( $C_q$ ) igual a 1. Si el valor para  $I_c$  es menor a 2.6, el suelo puede asociarse en primera instancia como un suelo de comportamiento granular.
- Posteriormente, el índice de comportamiento ( $I_c$ ) y el  $C_q$  se vuelven a calcular usando un  $n$  igual 0.5. Si para este caso  $I_c$  es menor a 2.6, el suelo se considera no plástico y del tipo granular, el índice de comportamiento del suelo obtenido puede utilizarse en los posteriores cálculos de licuación.

- Por otro lado, si el  $I_c$  obtenido con  $n$  igual 0.5 es mayor a 2.6, el suelo posiblemente sea del tipo limoso y además tener comportamiento plástico, para este caso se vuelve a calcular  $C_u$  e  $I_c$  con  $n$  igual 0.7, y este resultado ser usado para los posteriores cálculos y análisis de licuación del terreno bajo estudio.

El termino  $K_c$  que aparece en la ecuación ( 2.26) varía dependiendo del  $I_c$  que se obtiene de forma iterativa.

$$\text{Si } I_c \leq 1.64 ; K_c = 1 \quad (2.29)$$

$$\text{Si } I_c > 1.64 ; K_c = -0.403 I_c^4 + 5.581 I_c^3 - 21.63 I_c^2 + 33.75 I_c - 17.88 \quad (2.30)$$

A continuación, se define el factor de corrección por la presión de confinamiento ( $K_\sigma$ ) presente en la ecuación ( 2.15).

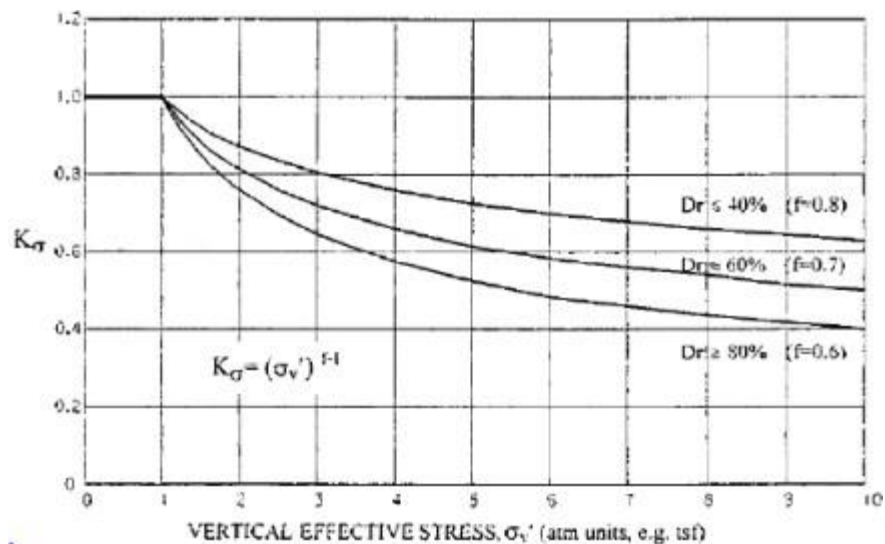


Ilustración 2.37 - Factor de corrección para la presión de confinamiento  $K_\sigma$ . [23]

Youd et al.2001 [24] representa este parámetro en función de la densidad relativa y de la presión efectiva de confinamiento según la siguiente expresión.

$$K_\sigma = (\sigma'_{v0}/P_a)^{f-1} \quad (2.31)$$

Con respecto al parámetro  $f$ , se puede afirmar. [24]

- Depende de la densidad relativa.
- Los casos donde la presión efectiva es inferior a 100 KPa, debe utilizarse  $K_\sigma$  igual a 1.

Para estimar el valor de la densidad relativa, se utiliza una correlación en base a casos de arenas consolidadas y no consolidadas [20].

$$D_r = A_0 + B_0 \ln \left[ \frac{q_c}{(\sigma'_{v0})^\alpha} \right] \quad (2.32)$$

Valores de los coeficientes son obtenidos de la tabla resumen presentada a continuación.

Tabla 2.3 - Coeficientes para densidad relativa. [20]

$A_0$	$B_0$	$\alpha$	R	$\sigma$	N
-1.292	0.268	0.52	0.94	7.9	456

Donde:

R = coeficiente de correlación.

$\sigma$  = desviación estándar.

N = número de ensayos considerados.

El factor de inclinación por corrección de la superficie ( $K_\alpha$ ), para el tema de taller este valor será considera igual a 1.

El factor de escala según la magnitud del sismo (MSF), queda definido por:

$$MSF = 10^{4.44/M_W^{2.50}} \quad (2.33)$$

El último paso para calcular CRR, corresponde a la obtención de la resistencia ciclicidad de una arena limpia para un sismo de 7.5 ( $CRR_{7.5}$ ). El cual se para datos obtenidos a partir de ensayos CPT.

$$Si (q_{c1N})_{cs} < 50 \quad CRR_{7.5} = 0.883 \frac{\sqrt{(q_{c1N})_{cs}}}{1000} + 0.05 \quad (2.34)$$

$$Si 50 \leq (q_{c1N})_{cs} < 160 \quad CRR_{7.5} = 93 \left( \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right)^3 + 0.08 \quad (2.35)$$

➤ **Boulanger & Idriss (2014)** [25]

Este método se aplica una corrección según el contenido de arenas limpias en el parámetro  $q_{c1N}$ , obteniéndose

$$q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N}$$

( 2.36)

A continuación, se presentan la resistencia en punta (parámetro obtenido del CPT) corregido por confinamiento y corregido por el contenido de finos ( $\Delta q_{c1N}$ ):

$$q_{c1N} = C_N q_{cN} = C_N \frac{q_c}{P_a} \quad (2.37)$$

$$\Delta q_{c1N} = \left( 11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6} \right) \text{Exp} \left( 1.63 - \frac{9.7}{FC + 2} - \left( \frac{15.7}{FC + 2} \right)^2 \right) \quad (2.38)$$

El factor de normalización  $C_N$  se define por la expresión.

$$C_N = \left( \frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^m \leq 1.7 \quad (2.39)$$

Donde:

$P_a$  = Presión atmosférica.

$\sigma'_v$  = Tensión vertical efectiva.

Además, se define el parámetro  $m$  presente en la ecuación ( 2.39) para el caso de ensayos CPT.

$$m = 0.784 - 0.0798 \sqrt{(N_1)_{60cs}} \quad (2.40)$$

La siguiente expresión se define el factor de corrección por comportamiento ( $K_\sigma$ ). También se utiliza esta ecuación cuando los datos son obtenidos mediante SPT.

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln \left( \frac{\sigma'_v}{P_a} \right) \leq 1.1 \quad (2.41)$$

$$C_\sigma = \frac{1}{37.3 - 8.27 (q_{c1Ncs})^{0.624}} \leq 0.3 \quad (2.42)$$

Lo siguiente para el caso de Boulanger & Idriss 2014 [25] es obtener el factor de escala asociado a la magnitud del sismo.

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1) (8.64 \text{ Exp} \left( \frac{-M_w}{4} \right) - 1.325) \quad (2.43)$$

$$MSF_{max} = 1.09 + \left( \frac{q_{c1Ncs}^3}{180} \right) \leq 2.2 \quad (2.44)$$

Como parámetro final obtenemos la resistencia cíclica para un sismo de 7.5, con la corrección para suelos finos.

$$CRR_{7.5} = \text{Exp} \left( \frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left( \frac{q_{c1Ncs}}{1000} \right)^4 - \left( \frac{q_{c1Ncs}}{140} \right)^3 + \left( \frac{q_{c1Ncs}}{137} \right)^4 - 2.8 \right) \quad (2.45)$$

### 2.10.3. Parámetros de Vulnerabilidad de licuación.

Los parámetros de vulnerabilidad son utilizados para caracterizar la gravedad de una zona en la cual ocurre licuación de estratos. Medir los asentamientos esperables o la influencia de estratos son algunos de los resultados esperables por estos métodos. A continuación, se presentan los siguientes parámetros: índice de potencial de licuación, la corrección de Ishihara para el LPI, asentamiento de reconsolidación volumétrica y el número de severidad.

#### ➤ Índice de Potencial de Licuación (LPI).

El potencial de licuación es un indicador que entrega un valor asociado a la gravedad del daño, está directamente relacionado con el espesor de la capa que licua. N. Guerrero [20] recomienda la utilización de un método simplificado por Iwasaki [27], que consiste en calcular un factor de resistencia a la licuación ( $F_L$ ).

$$LPI = \int_0^{20} F W(z) dz \quad (2.46)$$

$$F = 1 - F_L \text{ Si } F_L \leq 1 \text{ y } F = 0 \text{ Si } F_L > 1 \quad (2.47)$$

$$W(z) = 10 - 0.5 z \quad (2.48)$$

después de ensayos realizados por Iwasaki [27] se concluyó que LPI debe ser estudiado para los 20 metros más cercanos a la superficie, más allá de este rango los daños en la superficie pueden ser considerados despreciables [27].

A continuación, se entrega un cuadro resumen sobre los valores de LPI.

Tabla 2.4 - tabla de interpretación de los parámetros de potencial de licuación (PL). [27]

Escala LPI	Interpretación
$0 < LPI$	El PL es muy bajo, además no se requieren estudios detallados de licuación de suelos.
$0 < LPI \leq 5$	El PL sigue siendo bajo, en caso de estructuras importantes se requieren estudios de licuación.
$5 \leq LPI \leq 15$	El PL es alto, estudios de licuación son necesarios.
$15 < LPI$	El PL es muy alto, estudios de licuación se requieren,

➤ **Índice de Potencial de Licuación Inspirado en Ishihara ( $LPI_{ish}$ ).**

Este índice fue elaborado por Green [28], en busca de mejorar LPI el cual no representa de manera óptima el espesor de capas no licuables y como estas tienen influencia en los daños superficiales que se generan.  $LPI_{ish}$  se define por las siguientes expresiones:

$$LPI_{ish} = \int_{H_1}^{20} F(FS) \frac{25.6}{z} dz \quad (2.49)$$

$$F = \begin{cases} 1 - FS & Si \leq 1 \cap H_1 m(FS) \leq 3 \\ 0 & Otro caso \end{cases} \quad (2.50)$$

$$m(FS) = Exp\left(\frac{5}{25.56(1 - FS)}\right) - 1 \quad (2.51)$$

Donde:

FS = Factor de seguridad de licuación del suelo.

$H_1$  = Espesor del estrato inicial del suelo (recomendación: estrato no menor a 40 centímetros [20])

➤ **Asentamiento de Reconsolidación Volumétrica en 1-D ( $S_{v1D}$ ).**

Zhang [29] considera, para sismos que ocurren en suelos granulares y bajo una condición no drenada existe un reposicionamiento de partículas debido a la disipación de la presión de poros. El término  $S_{v1D}$  corresponde al asentamiento generado por la licuación de las capas que sufren reconsolidación volumétrica.

$$S_{v1D} = \sum_{i=1}^j s_{vi} \Delta z_i \quad (2.52)$$

Donde:

$\epsilon_{v1D}$  = deformación volumétrica de la sub-capa i.

$\Delta z_i$  = espesor de la sub-capa i.

j = es el número de sub-capas que posee el suelo.

Para concluir el asentamiento por reconsolidación se presenta un cuadro resumen con categorías según el daño esperado. [20]

Tabla 2.5 - Daños esperados por reconsolidación volumétrica y su representación en superficie.[29]

Escala de Reconsolidación Volumetrica	Asentamiento [cm]	Representación en superficie
Leve	0 – 10	Grietas menores.
Daño Medio	10 – 30	Grietas pequeñas, expulsión arena.
Daño Extensivo	30 – 70	Grandes grietas, expulsión de arena y grandes movimientos laterales.

➤ **Numero de Severidad de Licuación (LSN).**

Este término tiene por función, representar de forma cuantitativa la capacidad de un determinado terreno de sufrir daños debido a licuación, de acuerdo con dos parámetros el sismo al cual queda expuesto y según la profundidad de la napa freática. Tonkin y Taylor [30] definen LSN como:

$$LSN = 1000 \int \frac{\epsilon_v}{z} dz \quad (2.53)$$

Donde:

z = profundidad de la capa de estudio (desde a la superficie).

$\epsilon_v$  = deformación volumétrica, descrita en la reconsolidación volumétrica.

Tabla 2.6 - Rangos de LSN y sus respectivos efectos en la superficie.[30]

Rango de LSN	Característica
0 – 10	Efectos menores, difícil apreciarse de forma visual.
10 – 20	Pequeñas expresiones de licuación.
20 – 30	Moderadas expresiones de licuación, algunos daños estructurales.
30 – 40	De moderado a severo en cuanto a expresiones de licuación, asentamientos considerables que pueden generar daño estructural.
40 – 50	Mayores expresiones de licuación, daños sobre la superficie, asentamientos totales y diferenciales graves de estructuras.
> 50	Daño severo, evidencia de licuación en superficie, asentamientos totales y diferenciales de estructuras presentes.

### 3. Caso de Estudio.

#### 3.1. Introducción.

A continuación, se detalló la caracterización y posterior solución del problema que se planteó al inicio del trabajo de título. Para la obtención de los parámetros base, se usó estudios de mecánica de suelos y geofísica realizados por la empresa Ferrara Proyectos Especiales.

La ubicación de la obra es en la calle 5 Oriente, entre 1 y 2 Norte, en la ciudad de Viña del Mar. El proyecto consiste en la ejecución de un edificio de 9 pisos de altura y 2 subterráneos, en el área que se marcó en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el área aproximada del sector c corresponde a 2.875 m<sup>2</sup>.



*Ilustración 3.1 - Ubicación de la obra [Fuente: Google Earth].*

Lo siguiente que se hizo, fue utilizar los ensayos los ensayos CPT que se realizaron en la obra, con estos se calculó el diseño para las columnas de grava mediante el procedimiento descrito anteriormente. Luego realizar el procedimiento descrito por Nguyen 20013 [17] para el diseño del DSM, ambos métodos para reducir el asentamiento a un mismo valor y que este sea aceptable.

#### 3.2. Parámetros del Suelo.

A continuación, se presentó los parámetros obtenidos del trabajo de campo y trabajo en laboratorio, dichos ensayos fueron realizados por ingenieros geotécnicos de Ferrara. En los siguientes capítulos

se describió la estratigrafía del sector mediante calicatas, ensayos CPT para analizar la licuación en arenas, una vez se obtienen los resultados en laboratorio se determina los parámetros de diseño del suelo, además se identificó el nivel freático y se realizaron consideraciones para los posibles asentamientos.

### 3.2.1. Estratigrafía.

Se realizó una exploración geotécnica del sector de estudio, este consistió en 3 sondajes: dos de 15 metros y uno de 30 metros. A continuación, se presenta las coordenadas donde se ubican los sondajes y su ubicación en el espacio con la figura.

Tabla 3.1 - Coordenadas de los sondajes [35].

Punto de Exploración	Profundidad [m]	Coordenada Este	Coordenada Norte
Sondaje S1	15	262298 E	6343319 S
Sondaje S2	15	262319 E	6343264 S
Sondaje S3	30	262326 E	6343308 S

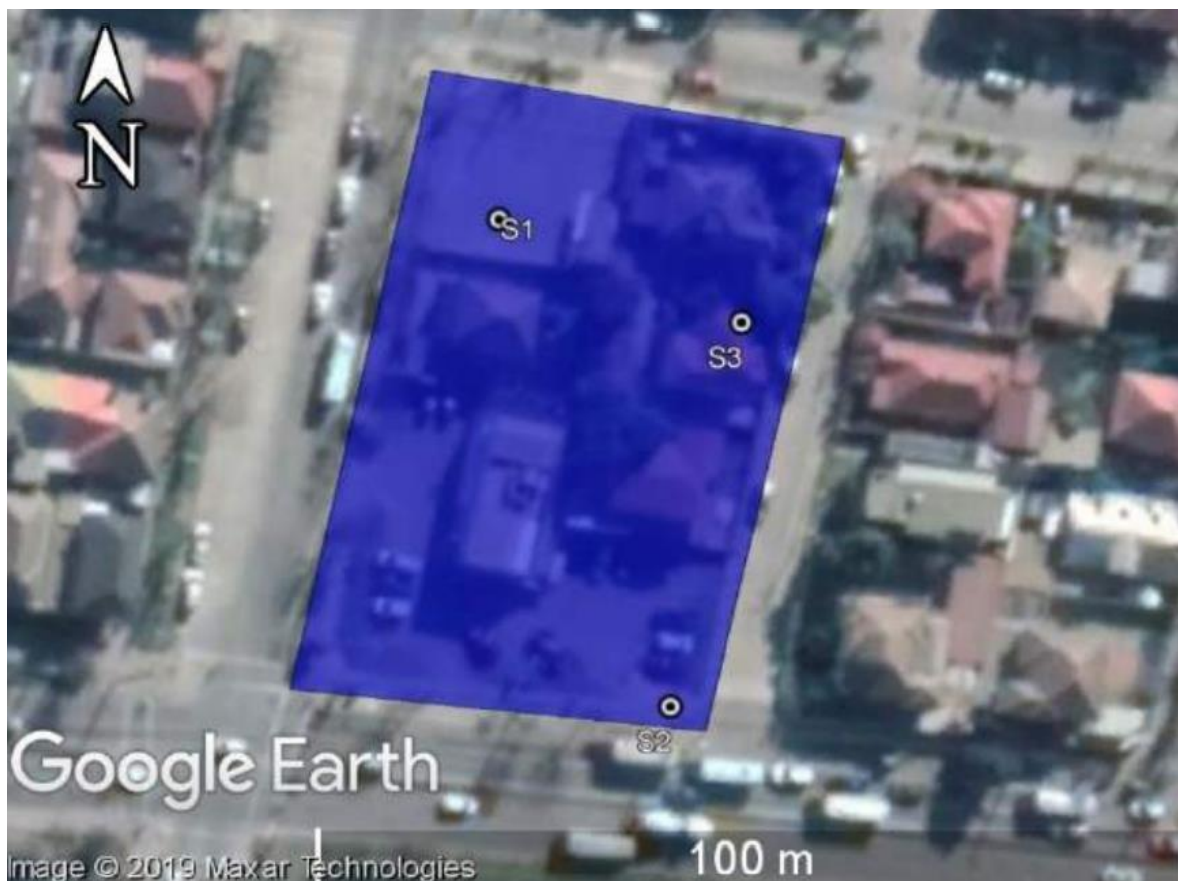


Ilustración 3.2 - Ubicación aproximada de los sondajes [35].

De acuerdo con los sondeos se presentó estratigrafía representada para cada sondeo.

### 3.2.1.1. Sondaje 1.

Tabla 3.2 - Descripción estratigrafía Sondaje 1 [35].

Horizonte	Profundidad [m]	Tipo de Suelo
E1	0 - 0.95	Rellenos de arena con finos y gravas
E2	0.95 - 2.45	Arena con finos y gravas aisladas. Clasificación UCSC: SM
E3	2.45 - 6.6	Arena con grano grueso.
E4	6.6 - 8.45	Arena grano fino. Clasificación USCS: SP - SM
E5	8.45 - 10.25	Arena de grano gruesa.
E6	10.25 - 15	Arena de grano fino con finos.

### 3.2.1.2. Sondaje 2.

Tabla 3.3 - Descripción estratigrafía Sondaje 2 [35].

Horizonte	Profundidad [m]	Tipo de Suelo
E1	0 - 0.4	Rellenos de arena con finos y gravas

<b>E2</b>	0.4 - 11.8	Arena de grano grueso. Clasificación USCS: SP, SP - SM
<b>E3</b>	11.8 - 15	Arena de grano fino con finos. Clasificación USCS: SM

### 3.2.1.3. Sondaje 3.

*Tabla 3.4 - Descripción Sondaje 3 [35].*

<b>Horizonte</b>	<b>Profundidad [m]</b>	<b>Tipo de Suelo</b>
<b>E1</b>	0 - 0.3	Rellenos de arena con finos y gravas. Clasificación USCS: SM
<b>E2</b>	0.3 - 6	Arena de grano grueso. Clasificación USCS: SP - SM, SP.
<b>E3</b>	6 - 30	Arena de grano fino. Clasificación USCS: SP

### 3.2.2. Ensayos CPT.

Dentro de la zona donde se construirá el proyecto inmobiliario se ejecutaron 2 sondajes CPT, don se llegó hasta los 27.4 metros de profundidad. Se adjunta coordenadas y ubicación donde de realizaron los CPT.

Tabla 3.5 - Coordenadas de los ensayos CPT [35].

CPT	Profundidad [m]	Coordenada Este	Coordenada Norte
CPT-1	27.4	262295	6343321
CPT-2	26.4	262316	6343268



Ilustración 3.3 - Ubicación ensayos CPT, realizados en la obra [35].

Para el estudio de licuación se consideró los siguientes parámetros:

$$M_w = 8.8$$

$$A_g = 0.57g$$

De acuerdo con la información que se obtuvo de los 3 sondajes en terreno, se determinó que la profundidad del nivel freático es 3 metros bajo el nivel de terreno natural [35].

### 3.2.3. Parámetros de Diseño.

A continuación, se presentó una tabla resumen de los parámetros que caracterizan el suelo donde se ejecutara a la obra, estos parámetros se utilizaron para desarrollar los métodos DSM y columnas de grava.

Tabla 3.6 - Parámetros geotécnicos, obtenidos por sondajes para el suelo de fundación [35].

Estrato	Descripción	Profundidad [m]	Densidad [ $\gamma$ ] [Ton/m <sup>3</sup> ]	Angulo de fricción interno [ $\phi$ ] [°]	Cohesión [c] [Ton/m <sup>2</sup> ]	Módulo de Young [E] [MPa]	Módulo de Poisson [ $\nu$ ]
H1	Relleno	0 -2	1.7	30	-	-	-
H2	Arena gruesa rubia	2 – 4	1.8	30	-	0.4	0.4
		4 – 7	1.8	35	-	0.35	0.35
		7 – 10	1.9	38	-	0.33	0.33
H3	Arena fina gris	10 - 30	1.9	38	-	0.3	0.3

### Susceptibilidad de Suelos.

A continuación, se analizó el índice de comportamiento que se obtuvo a través de los ensayos CPT, con el fin de evaluar si alguna capa presentaba la susceptibilidad para licuar o se comporta como un suelo fino de alta plasticidad.

Zone	Soil Behavior Type	$I_c$
1	<i>Sensitive, fine grained</i>	N/A
2	<i>Organic soils – clay</i>	> 3.6
3	<i>Clays – silty clay to clay</i>	2.95 – 3.6
4	<i>Silt mixtures – clayey silt to silty clay</i>	2.60 – 2.95
5	<i>Sand mixtures – silty sand to sandy silt</i>	2.05 – 2.6
6	<i>Sands – clean sand to silty sand</i>	1.31 – 2.05
7	<i>Gravelly sand to dense sand</i>	< 1.31
8	<i>Very stiff sand to clayey sand*</i>	N/A
9	<i>Very stiff, fine grained*</i>	N/A

Ilustración 3.4 - Cuadro resumen sobre la clasificación de susceptibilidad según el  $I_c$ . [21]

Para índices de comportamiento menores o igual a 2.6 el suelo tiene la capacidad de entrar en estado de licuación. A continuación, se presentan resultados obtenidos de 2 ensayos de cono de penetración en la obra ubicada en 5 oriente, como se detalló en la sección 3.2.2. Ensayos CPT.

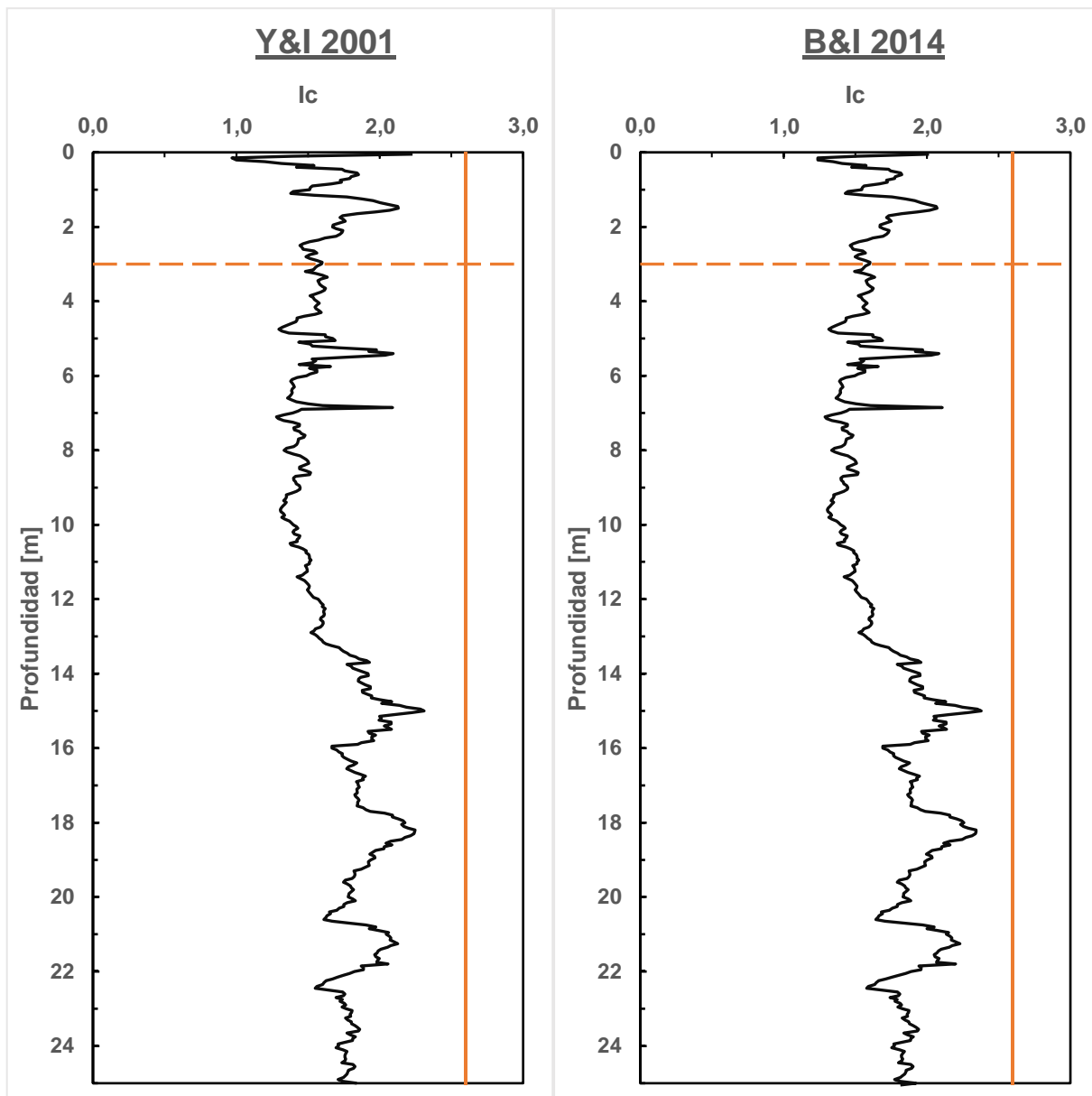


Ilustración 3.5 - Análisis de Susceptibilidad para **CPT1**, de acuerdo con los métodos propuestos por Y&I [24] y B&I [25].

A continuación, se presentaron resultados para el CPT2.

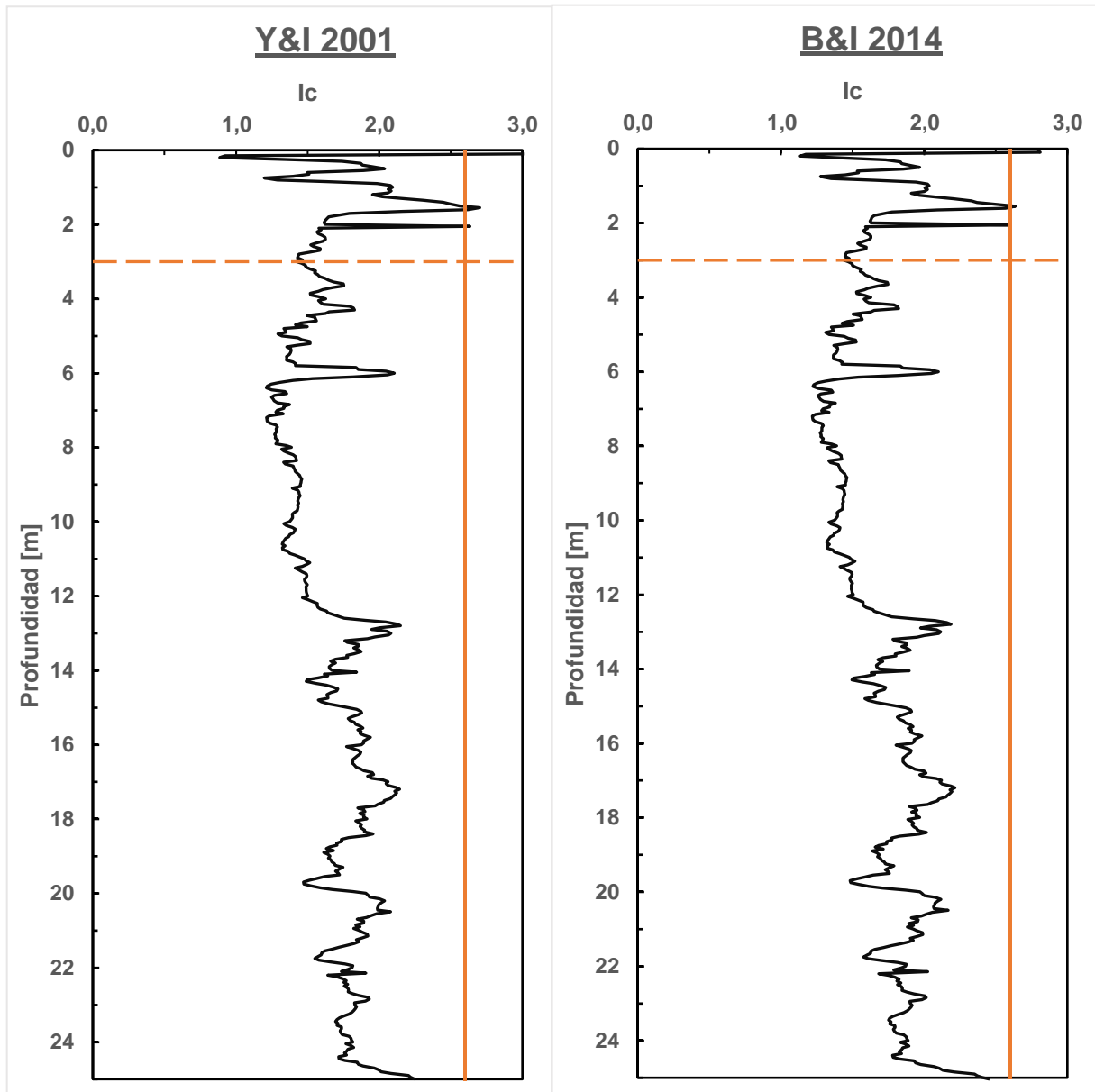


Ilustración 3.6 - Análisis de Susceptibilidad para **CPT2**, de acuerdo con los métodos propuestos por Y&I [24] y B&I [25].

Presentaron una marca correspondiente al nivel freático determinado, además otra marca vertical, que correspondió al límite de comportamiento ( $I_c = 2.6$ ).

Ambos ensayos CPT, determinaron que la zona de edificación es susceptible a licuar, esto se debió al tipo de suelo granular existente en los estratos. Por lo tanto, se requieren estudios más profundos. Los cuales son presentados a continuación para columnas de gravas y el método Deep Soil Mixing.

### 3.3. Columnas de Grava.

#### 3.3.1. Introducción.

Para el cálculo de las columnas de grava, se fijó algunos parámetros o características en el diseño, como es el diámetro de las columnas de grava y la forma de distribución en la superficie a mejorar. El valor del diámetro es 0.88 metros y la distribución corresponde a una triangular.

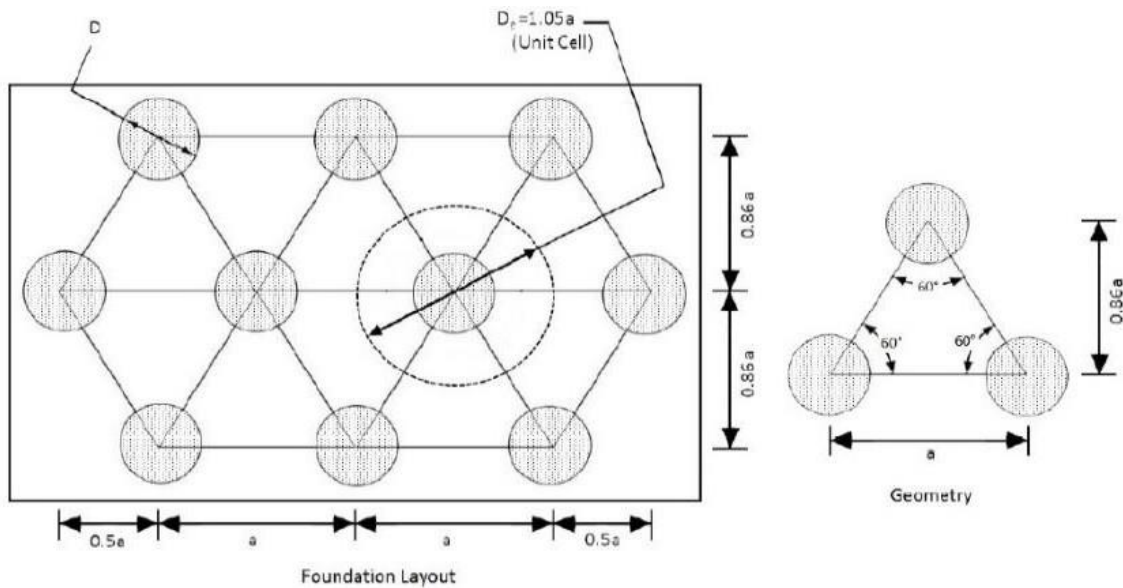


Ilustración 3.7 - Distribución en la superficie, para las columnas de grava [19].

Con este método se consideró llegar a una reducción de los asentamientos en la superficie de 5 centímetros. A continuación, se presentaron resultados para el estudio de suelos, que se obtuvieron desde los 2 ensayos CPT realizados en la obra.

### 3.3.2. Factor de Seguridad.

A continuación, se expusieron resultados sobre la mejora el suelo, mediante la implementación de columnas de grava. Como se mencionó en el capítulo 2.9 este tipo de mejora se refleja como un método de rigidización, densificación y drenaje. Pero en este trabajo de título solo se enfocó en las 2 primeras.

Tabla 3.7 - Cuadro resumen de mecanismo generados por las columnas de grava.

	Mecanismo	Efecto	Parámetro
<b>Mitigación mediante</b>	Densificación	Aumento	CRR
	Rigidización	Disminución	CSR
	Drenaje	Disminución	Presión de Poros

Se presenta cuadro resumen de parámetros utilizados para el diseño de las columnas de grava.

Tabla 3.8 - Datos utilizados en el diseño de las columnas de grava.

**CPT 1 y 2 -  
Columnas de  
Gravas**

Parámetro	Valor
Diámetro, d [m]	0.88
Gr	3
Espesor, e [m]	0.8
Lado, S [m]	3
Alto, H [m]	14
$A_r$ [%]	6.4
$\gamma_r$	0.469
$R_{rd}$	0.974

De acuerdo con los parámetros descritos en la Tabla 3.8 y en conjunto con los factores de rigidización y densificación presentados en 2.9.3. Fueron añadidos al procedimiento para evaluar el potencial de licuación de 2.10. En el anexo A se presentó una fracción de datos desde los 5.5 hasta los 6.5 metros de profundidad, donde se incorpora columnas de grava.

A continuación, se presentaron los resultados de acuerdo con CPT1 y CPT2, expresados a través del factor de seguridad obtenido utilizando los métodos de Youd & Idriss [24] y el método de Boulanger & Idriss [25].

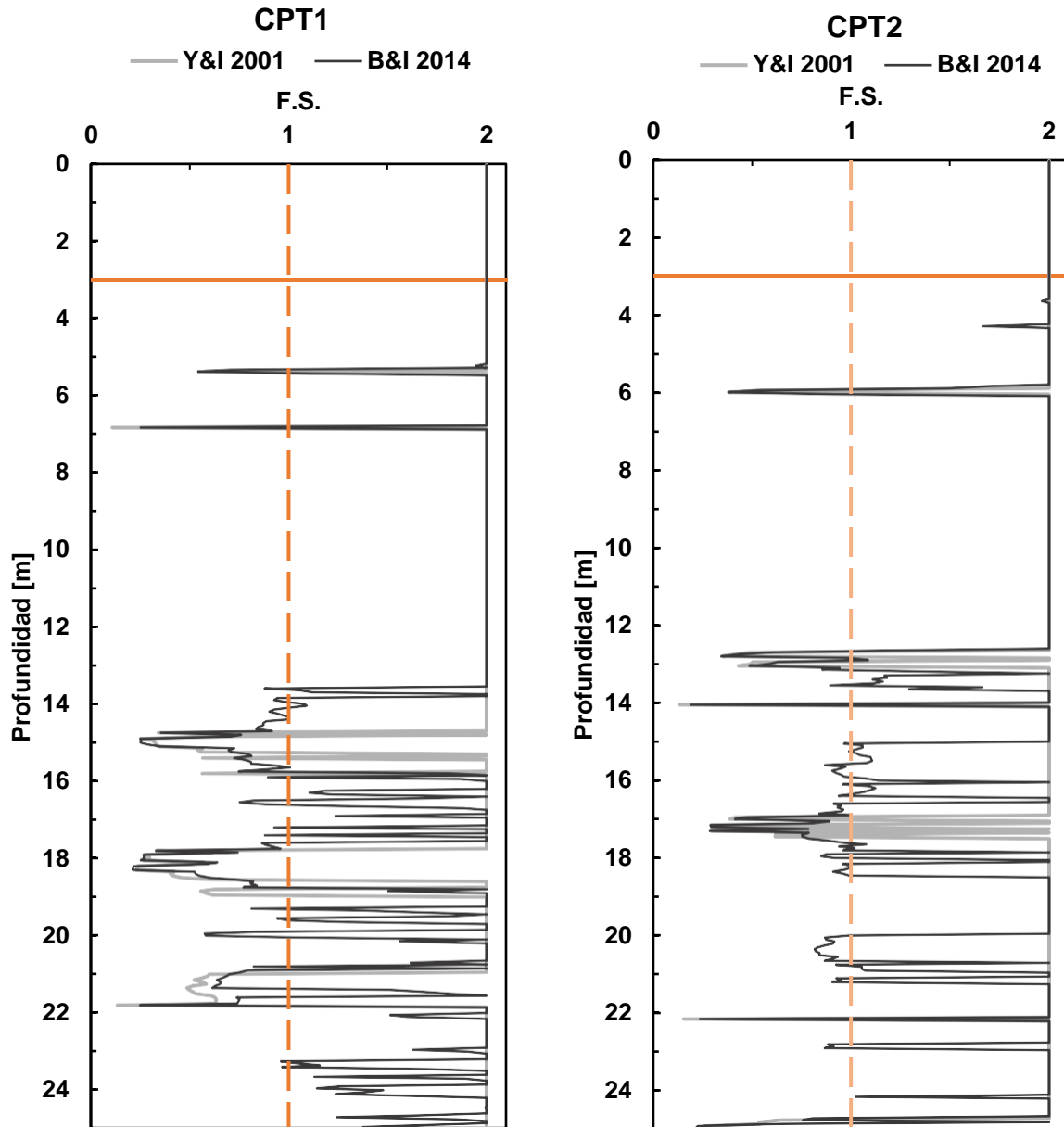


Ilustración 3.8 - Resultados de CPT1 y CPT2, mediante métodos de Youd & Idriss [24] y Boulanger & Idriss [25].

Destacó en ambos ensayos CPT, dos rangos de zonas donde que son potencialmente licuables, mediante parámetros de vulnerabilidad se estudiara el alcance que puedan llegar.

Las 2 zonas que se repiten son, la primera entre los 6 y 8 metros de profundidad, y una segunda zona desde los 13 metros hasta los 20 metros. Estudios de Cetin [37], los efectos del suelo en la superficie de trabajo son producidos por los primeros 20 metros debajo de este.

### 3.3.3. Parámetros de Vulnerabilidad.

En esta sección se presentaron resultados obtenidos para los parámetros de vulnerabilidad definidos en el punto 2.10.3. Parámetros de Vulnerabilidad de licuación., correspondientes a ambos ensayos de cono de penetración estándar (CPT).

#### 3.3.3.1. Índice de Potencial de Licuefacción (LPI).

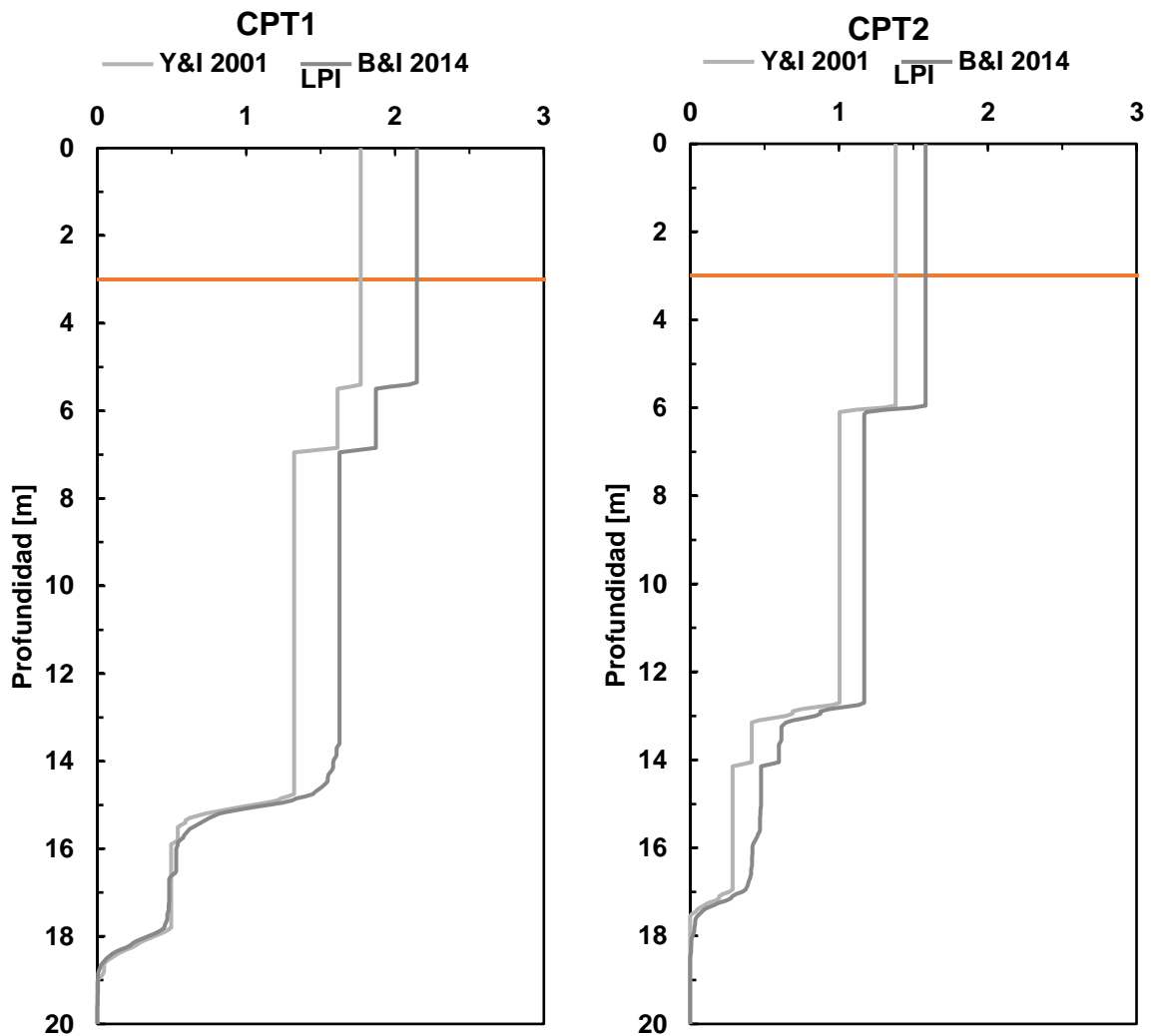


Ilustración 3.9 - Resultados de Índice de potencial de licuefacción, ensayos CPT para columnas de gravas.

De acuerdo con resultados presentados sobre LPI esto indican que el potencial de licuación es bajo, pero en caso de fundar estructuras importantes estudios de licuación son necesarios.

### 3.3.3.2. Índice de Potencial de Licuación corrección de Ishihara ( $LPI_{ish}$ ).

Resultados sobre la corrección de Ishihara, indican mismo resultado que en análisis de potencial de licuación, solo realizar estudios de licuación completos, en caso de que se quiera fundar una estructura importante.

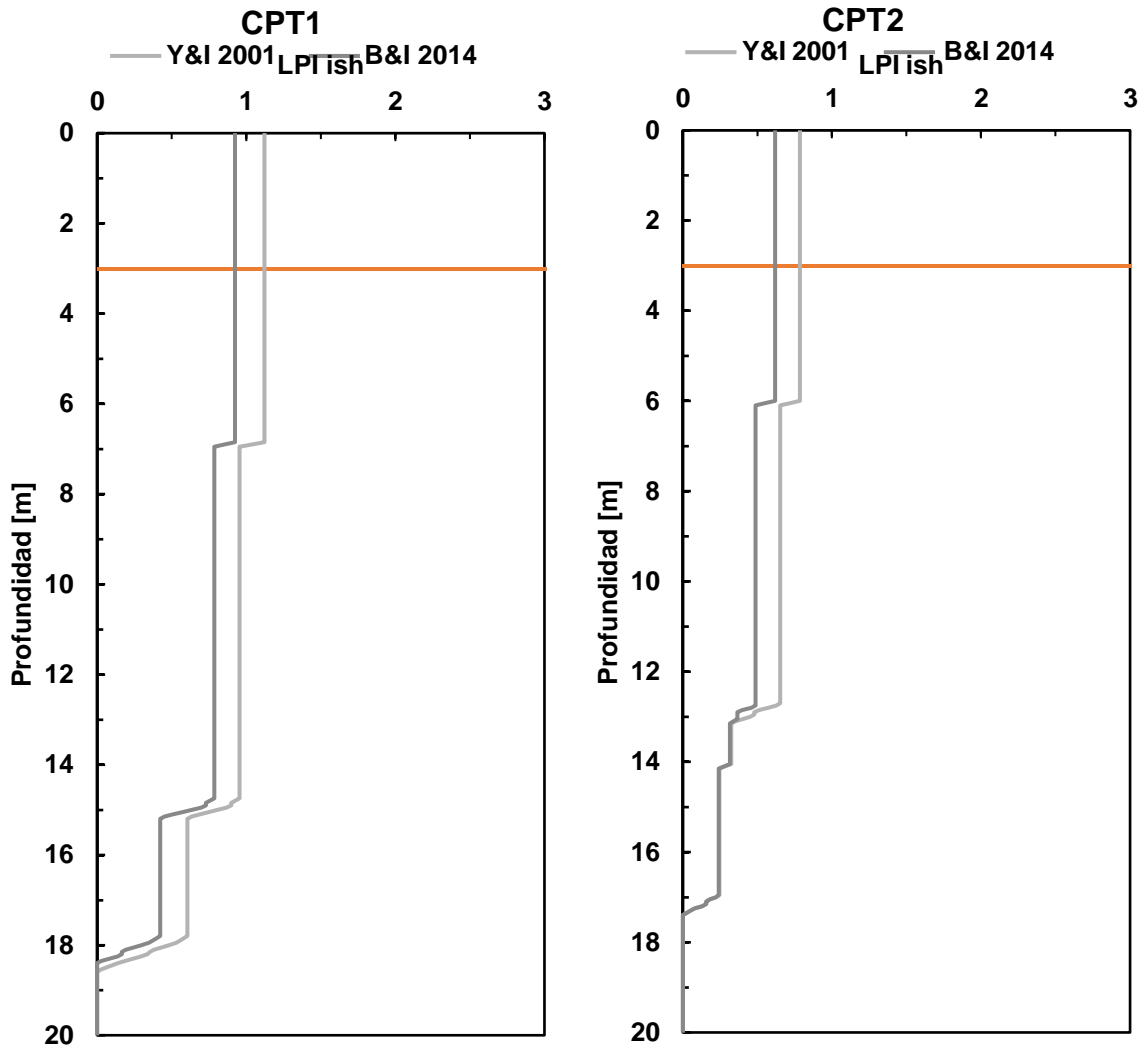


Ilustración 3.10 - Resultados de Índice de potencial de licuefacción con corrección, ensayos CPT para columnas de gravas.

### 3.3.3.3. Asentamiento de Reconsolidación Volumétrica ( $S_{V1D}$ ).

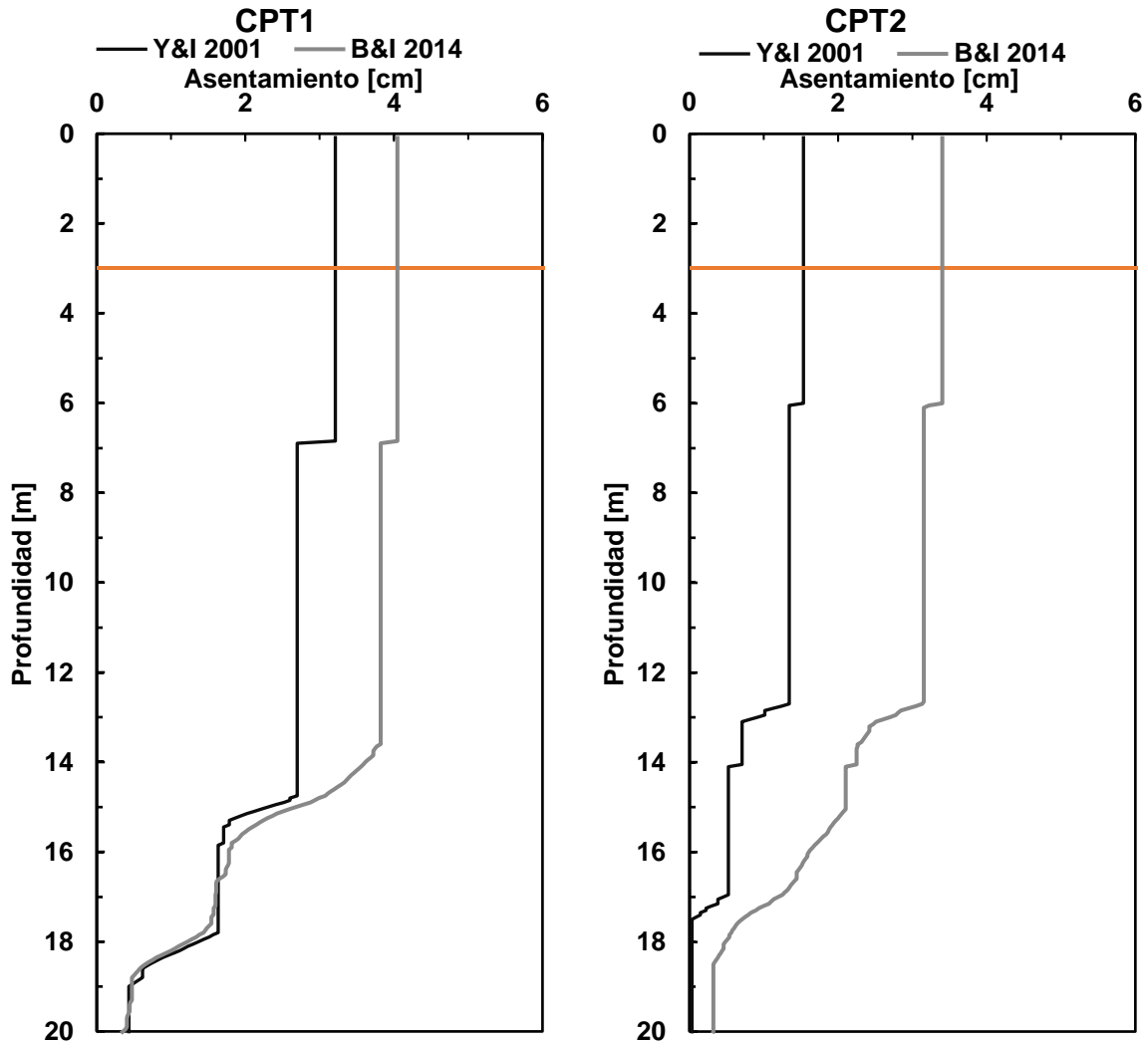


Ilustración 3.11 - Resultados del asentamiento generado en ensayos CPT, para columnas de gravas.

Una exigencia al momento que se realizó el diseño fue controlar los asentamientos del suelo en valores no superiores a 5 centímetros. Este requerimiento se cumplió, de esta forma en caso de que el suelo licue solo se expresara en grietas menores en la superficie.

### 3.3.3.4. Número de Severidad de Licuación (LSN).

Lo siguiente corresponde a resultados obtenidos para el número de severidad, se presentaron los resultados para ambas fuentes de datos.

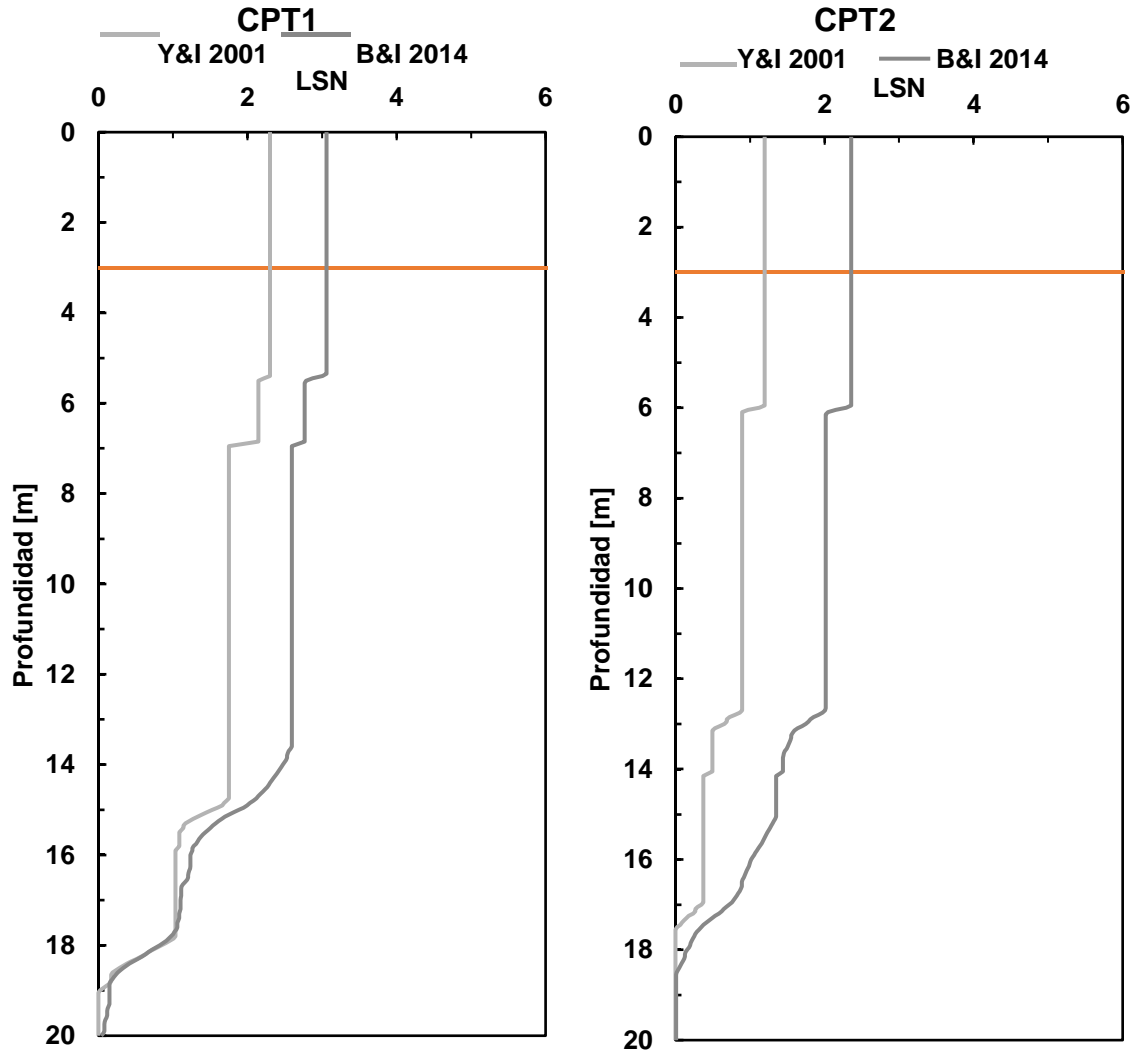


Ilustración 3.12 - Resultados del número de severidad de licuación, en ensayos CPT para columnas de gravas.

Este indicador determinó, que riesgos de licuación son mitigados por el diseño y solo se expresaran en a la superficie de forma menor, evitando manifestaciones como asentamientos totales y daños severos en la superficie.

### 3.4. The Deep Soil Mixing.

#### 3.4.1. Introducción.

Similar que en sección 3.3, se fijaron condiciones según aspectos de diseño. El espesor de muro de los paneles de soil mixing, son considerados variables de acuerdo con los distintos casos de diseño, los cuales oscilan entre 0.6 – 0.9 metros de espesor efectivo, como se explicó en una etapa posterior. También la distribución se consideró de tipo panel.

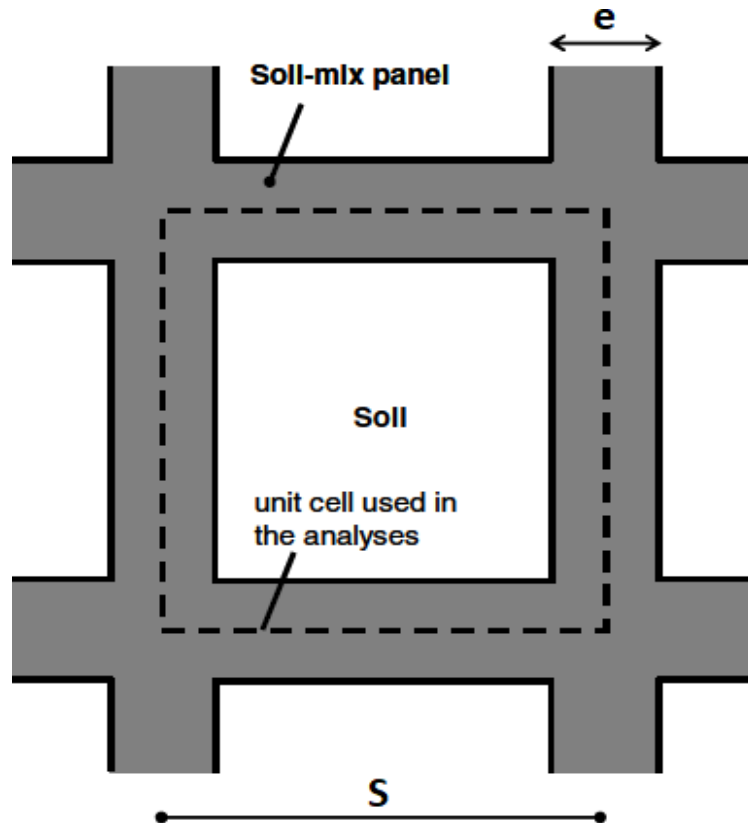


Ilustración 3.13 - Distribución tipo panel del modelo DSM para el caso de estudio. [17]

Del mismo modo que en columnas de grava se estableció soluciones de diseño, esta vez se utilizó sistema de soil mixing, donde cada modelo varió según la longitud de traslapo entre las columnas que conformaron el muro, de igual manera que en el diseño de columnas de grava, se fijó un asentamiento máximo de 5 centímetros en la superficie del suelo. Estos resultados fueron considerados para ambos casos de estudio, provenientes de los ensayos de Cono Penetration Test (CPT), realizados en puntos especificados anteriormente del proyecto.

Antes de presentar el diseño escogido de Deep Soil Mixing, se realizó un estudio económico, el cual es presentado a continuación, donde se determinó el diseño más eficiente entre varias opciones, según los antecedentes recopilados, y posteriormente los costos asociados a materiales, mano de obra, maquinaria entre otros factores descritos en las siguientes secciones.

Los valores utilizados para el precio del dólar (USD) y la unidad de fomento (UF) son \$811 y \$30.052 respectivamente en el momento del análisis, que fueron obtenidas el día 23 de noviembre del año 2021. Estos valores se utilizaron para la totalidad de los presupuestos presentados en este trabajo de título, al momento de referirse el DSM.

### 3.4.2. Opciones de diseño DSM.

Como se mencionó, existe una problemática extra, a la hora de realizar el sistema de grillas, a través de muros con columnas traslapadas. Como se muestra en la ilustración 3.15, debido que el espesor de muro efectivo varía según la longitud de traslapo, entre dichas columnas durante procedimiento. Se comenzó a estudiar longitudes de traslapo y que estas fueran distintas para cada caso de diseño, como son presentadas más adelante.



Ilustración 3.14 - Sistema de grillas elaboradas con columnas simples traslapadas.[17]

De acuerdo con esto, se elaboraron 4 diseños, considerando distintas longitudes máximas de traslapo como se presentó en la Tabla 3.9 - Configuración casos de diseño., según estas longitudes vario el espesor de diseño del muro y la cantidad de columnas a ejecutar.

Tabla 3.9 - Configuración casos de diseño.

Caso de Diseño	Longitud Efectiva [cm]	Ancho Efectivo [m]	N° Columnas
A	20	0.6	1.343
B	30	0.7	1.543
C	40	0.8	1.965
D	57	0.9	2.556

El parámetro llamado ancho efectivo, se refiere a la longitud máxima alcanzada por el traslapo de dos columnas continuas. A continuación, se presentó un dibujo de dos columnas secantes, con el fin de complementar la explicación de ancho efectivo considerado para el diseño. El caso A, que corresponde un ancho efectivo de 60 centímetros, como el traslapo entre ambas columnas

corresponde al espesor más bajo, la consideración es usar dicho espesor para el diseño de los muros.

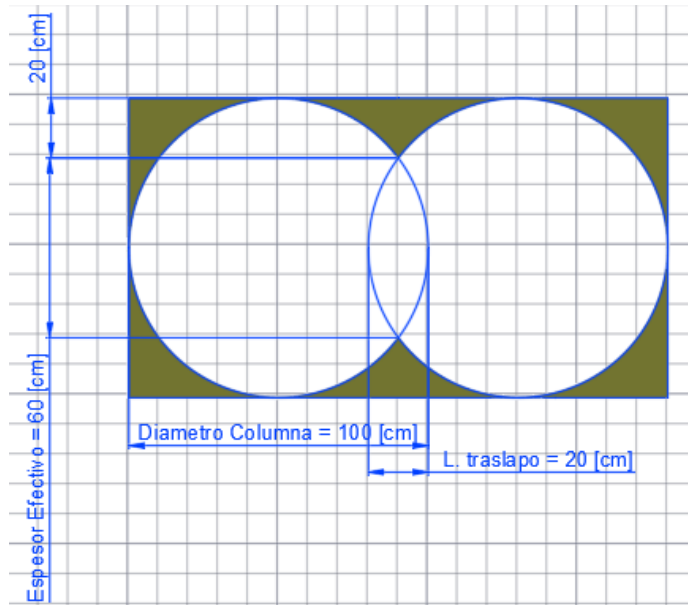


Ilustración 3.15 - columnas secantes. Caso A de diseño, con medidas respectivas.

Para todos los casos de diseño se consideró el área de la columna, considerando 1 metro de diámetro. El valor de diseño que cambió fue el espesor y dependió de la longitud de traslapo entre columnas. Una vez definidos los parámetros de cada diseño, considerando sus respectivos espesores efectivos, se generó una representación del diseño distribuido en la superficie considerada para el proyecto descrito en 3.1 proyecto de edificio 5 oriente. En forma de ejemplo, se presentó a continuación el modelo A.

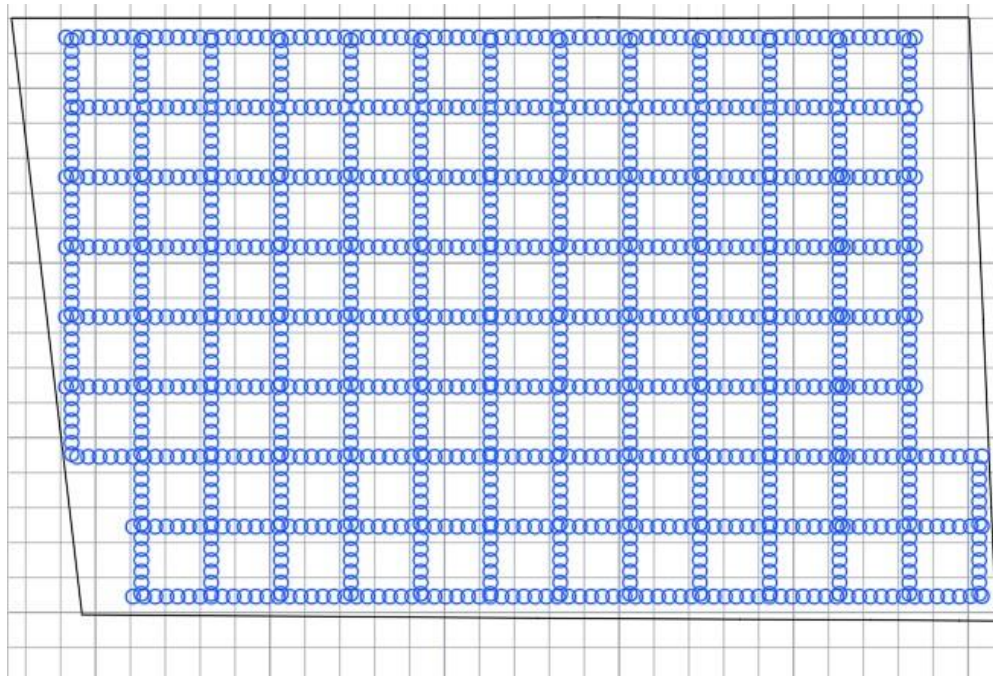


Ilustración 3.16 - Modelo de diseño A, representar el sistema de paneles.

Además, Ferrara Proyectos Especiales, proporciono para este trabajo de título presupuestos con la finalidad de obtener un valor certero, sobre cotizaciones de hormigón, entre los cuales se destacó uno realizado por Polpaico el 26 de febrero del año 2020, en el cual estableció un valor de 2.01 UF el metro cubico para columnas de 1 metro de diámetro.

Tabla 3.10 - Resumen costos de hormigón para diseños propuestos.

Caso de Diseño	Longitud Total [m]	N° Columnas	Material para Relleno	Valor Total [UF]	Valor Unitario [UF/ml]
A	21.488	1.343	15%	5.088,31	0,237
B	24.688	1.543	15%	5.846,06	0,237
C	31.440	1.965	15%	7.444,91	0,237
D	40.896	2.556	15%	9.684,07	0,237

Además, se observó que la cantidad de columnas por caso de diseño fue en aumento, de forma directa con el aumento del diámetro de diseño. También el comportamiento de las longitudes de traslapo fue decreciendo, con el aumento del número columnas. Otro factor para considerar es el porcentaje de relleno, como se mencionó el DSM posee la ventaja de reutilizar el mismo suelo natural y generar poco desecho [1], debido a esto se consideró un 15% de material para mejorar el suelo.

El siguiente paso consiste en determinar los costos asociados al material y equipos asociados al método de paneles de soil mixing, el que es tratado en la siguiente sección.

El diseño A resultó ser que tuvo un valor menor respecto a los otros, esto influyó en parte por longitudes de traslapo mayores de los otros casos, considerando además que la generación de columnas de 1 metro de diámetro, es igual en todos los diseños.

El diseño seleccionado para las posteriores etapas de estudio es el A, lo que siguió fue determinar gastos complementarios a la ejecución de DSM y los posteriores resultados.

### 3.4.3. Costos Asociados.

Una vez se obtuvo el costo del material, lo siguiente fue determinar los costos asociados a: equipos, mano de obra y otros parámetros fundamentales del estudio comercial. Con el fin de obtener un presupuesto final.

A continuación, se presentó un cuadro resumen, que busca obtener un tiempo estimado de duración de la obra, considerando el método de DSM.

Tabla 3.11 - Cuadro resumen sobre duración de la obra, utilizando DSM.

Datos	Valor	Unidad
Long. Total, Excavación	21.488	[ml]
Productividad Potencial	200	[ml/día]
Duración Teórica Obra	108	[días]
Días Sin Producción	22	[días]
Movilización	3	[días]
Duración Considerada	133	[días]
Días Adicionales MdO	2	[días]
Días Totales MdO	135	[días]

Fueron presentados valores con la finalidad de obtener la duración del proyecto mediante la ejecución de paneles de DSM, para esto se consideró el rendimiento del equipo BG28-H, que posee FERRARA INGENIERIA & CONSTRUCCION, dicho rendimiento diario, es un valor entregado y tabulado por BAUER, empresa alemana que vende estos equipos.

Posteriormente se obtuvo los días que la máquina concluye la ejecución de columnas sin presencia de inconvenientes (caso ideal), posteriormente se agrega un margen del 20% (criterio Ferrara) de los días por eventualidades que puedan surgir.

También se considera un tiempo de traslado de equipos, donde se consideró el hecho que la obra se realizara en viña de mar y el equipo se encuentra en bodega (La Pintana, Santiago). Finalmente se alcanzó una duración de 135 días para la instalación de paneles DSM por parte del equipo BG28-H.

A continuación, se considera sueldos correspondientes a la mano de obra para lograr el correcto funcionamiento del equipo de ejecución de columnas de soil mixing. Valores estimados se obtuvieron de proyectos anteriormente realizados por la empresa FERRARA. Los sueldos no consideran viáticos, para el personal en terreno.

Tabla 3.12 - Partida asociada a la mano de obra mínima para poner en funcionamiento el sistema DSM para ejecutar un sistema de grillas.

Mano de Obra	Unidad	Días	N° Personas	P. Total [\$]	UF	USD
Operador BG28-H	H-día	135	1	18.685.890	621,79	23.040,55
Operador planta de Lodos	H-día	135	1	6.417.765	213,56	7913,40
Ayudante	H-día	135	2	8.602.665	286,26	10.607,48
<b>Total</b>				<b>33.706.320</b>	<b>1.121,60</b>	<b>41.561,43</b>

Debido a las dimensiones del equipo de perforación se utilizan dos ayudantes, para el equipo, en un futuro no se descarta optimizar el sistema de trabajo y lograr una reducción en la cantidad de ayudantes. Estos valores corresponden para la duración completa del proyecto.

El siguiente consistió en los costos asociados a tener los equipos propios en la obra.

Tabla 3.13 - Partida asociada al costo de equipos para poner en funcionamiento el sistema DSM para sistema de grillas.

Costo Equipos	Cantidad	Cantidad	Unidad	P. Total [\$]	UF	USD
BG28-H	1	133	día	180.780.511	6.015,59	222.910,61
Planta Lodo	1	133	día	3.997.809,76	133,02974	4.929,48
Bomba de Hormigonado	1	6.3	mes	56.798.280	1.890	70.034,87
Excavadora	1	1064	horas	72.352.000	2.407,56023	89.213,31
<b>Total Equipos</b>				<b>313.928.600</b>	<b>10.446,18</b>	<b>387.088,28</b>

El caso de la bomba de hormigonado se buscó arrendar una, el valor se consideró la totalidad de días (incluyendo fines de semana) que permanecerá arrendada para la obra. El caso de la retroexcavadora es el tiempo necesario para facilitar el desplazamiento de la maquinaria de perforación dentro del área de trabajo.

La siguiente partida corresponde al consumo de combustible utilizado por equipos desplegados en terreno.

Descritos los principales elementos a la hora de evaluar el costo de un método, se presentó un cuadro resumen que contiene las partidas descritas anteriormente.

Tabla 3.14 - Partida asociada al consumo de combustible para desarrollar la técnica DSM para formar un sistema de grillas.

<b>Diesel</b>	<b>N° Equipos</b>	<b>P. Total [\$]</b>	<b>UF</b>	<b>USD</b>
Combustible BG28-H	1	13.965.000	464,69	17219,48
Combustible Excavadora	1	10.378.368	345,34	12797,00
Combustible Bomba	1	3.993.990	132,90	4924,77
<b>Total Combustible</b>		<b>28.337.358</b>	<b>942,94</b>	<b>34.941,25</b>

Para la obtención de los valores asociados al consumo de combustible, se consideró el gasto diario de los equipos por separado, obtenidos de proyectos ejecutados anteriormente por FERRARA y amplificados por la duración del proyecto.

Para finalizar el estudio de costos, se presentó una tabla resumen con los valores totales, obtenidos para cada partida y su respectivo porcentaje respecto al valor total, para llevar a cabo el método DSM.

Tabla 3.15 - Costos finales de las partidas más relevantes para considerar en la ejecución de un sistema de grillas para el DSM.

<b>Partida</b>	<b>Valor Total [\$]</b>	<b>Porcentaje de Participación</b>
Mano de Obra	33.706.320	6%
Combustibles	28.337.358	5%
Materiales	152.913.762	29%
Costo Equipos	313.928.600	59%

Según la Tabla 3.15 el valor del método está regulado por el costo/arriendo de los equipos para el proyecto y la cantidad de hormigón para generar la mezcla de suelo. Entre ambos ítems abarcan aproximadamente el 90% del costo por utilizar el sistema de grillas, mediante DSM.

Tabla 3.16 - Resumen final del presupuesto para ejecutar grillas de DSM.

	<b>Peso Chileno</b>	<b>UF</b>	<b>USD</b>
<b>Costo Total [\$]</b>	528.886.041	17.599,03	652.140,62
Precio Unitario [\$/ml]	24.613,09	0,82	30,35
Precio Unitario [\$/uni]	393.809,412	13,10	485,58

Por otra parte, el presupuesto considerando el diseño A, entrego un valor total cercano a 17.600 unidades de fomento. Además, el valor del metro lineal de perforación se obtuvo un valor aproximado de 0,8 UF y el precio de ejecutar una columna de DSM fue cercano a 13 UF.

Lo siguiente corresponde a presentar parámetros y resultados obtenidos del cálculo de DSM. Posteriormente se finaliza el estudio con comparaciones técnico/económicas entre DSM y columnas de grava, en el capítulo 3.5.

### 3.4.4. Factor de Seguridad

Para la obtención del factor de seguridad, presentado en la ecuación ( 2.15), se aplicó un factor de rigidización aportado por el sistema de paneles de soil mixing, que generan una disminución de CSR.

De esta forma de busco estudiar el potencial de licuación presente en los suelos viñamarinos correspondientes al proyecto presentado en 3.1.

A continuación, se analizó el factor de seguridad obtenido en ambos ensayos de cono de penetración estándar (CPT).

#### 3.4.4.1. CPT1 y CPT2.

A continuación, se presentó tabla resumen de parámetros finales, considerados para el sistema de paneles de soil mixing, se consideró los mismo parametros para los casos de CPT.

*Tabla 3.17 - Resumen de parámetros utilizados para el diseño de paneles, según CPT1 y 2.*

<b>CPT 1 y 2 - Soil Mixing</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
$G_r$	50
Espesor, e [m]	1
Lado, S [m]	5
Alto, H [m]	14
$A_r$ [%]	22,6
$\gamma_r$	0,578
$R_{rd}$	0,226

Al igual que se presento para el caso de columnas de grava, se agregó en el anexo B, datos obtenidos del diseño de DSM, que surgieron de la tabla 3.17 y el cálculo del factor de reducción de corte, visto en el capítulo 2.8. Estos parámetros en conjunto son ingresados al procedimiento descrito en 2.10. De esta forma se presentó en el anexo B, datos obtenidos des los 5.5 metros de profundidad hasta los 6.5 metros, donde los paneles de SM se encuentran incorporados.

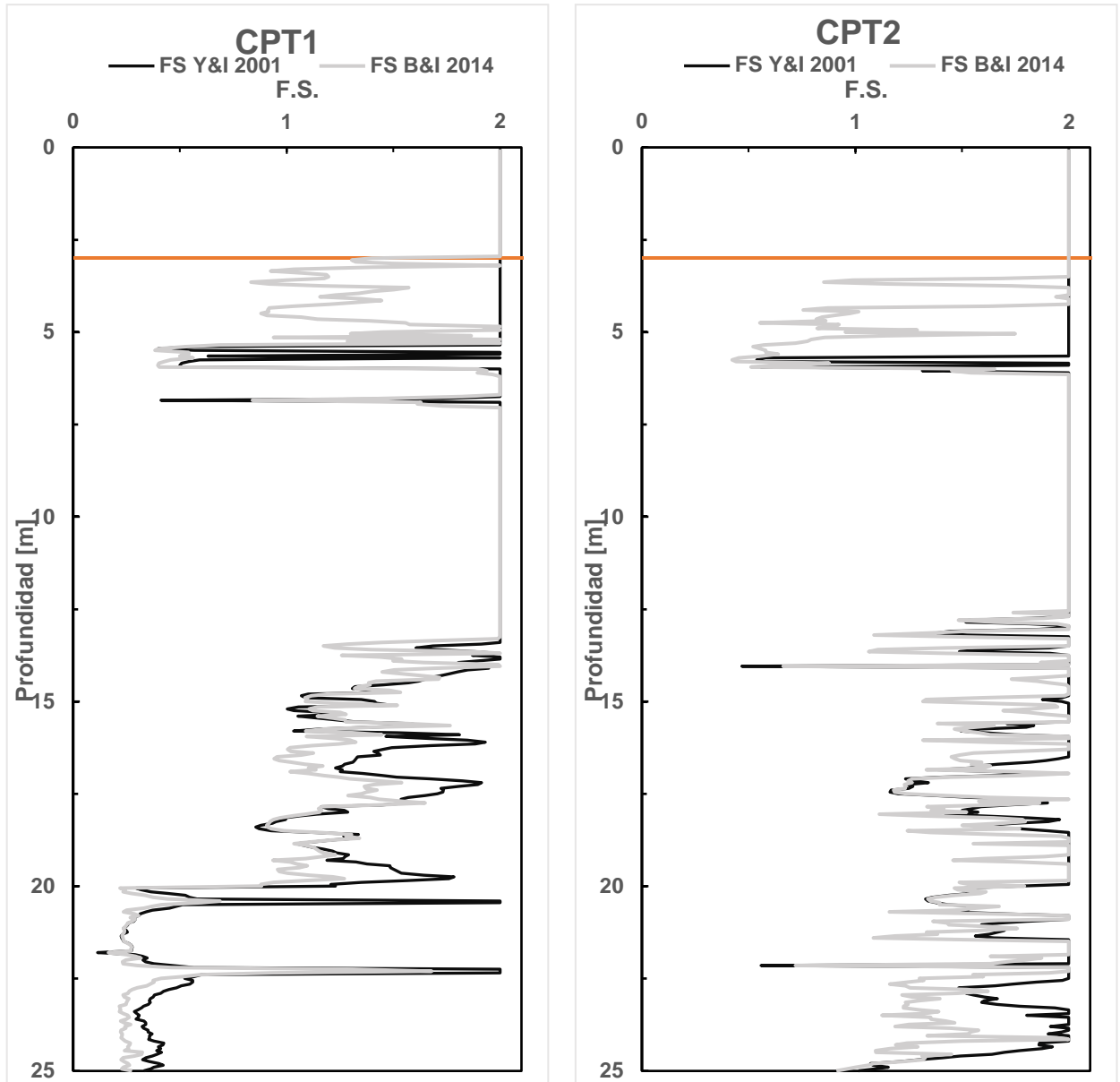


Ilustración 3.17. Casos CPT1 Y CPT2, comportamiento del F.S. en los estratos de análisis

Los resultados de los ensayos CPT expresaron comportamientos similares. Posteriormente al realizar la comparación para los métodos de obtención del factor de seguridad Y&I [25] y B&I [26].

Ambos métodos mostraron dos zonas con estratos licuables, el primero entre los 3 metros donde se ubicó el nivel freático y los 7 metros de profundidad, el segundo entre los 12.5 y 20 metros aproximadamente.

Se menciona un artículo de Cetin [35], que recomienda despreciar estratos licuables posterior a 20 metros de profundidad, esto se debe a la poca influencia sobre la superficie. De acuerdo con esto se definió la zona licuable tratada hasta los 20 metros de profundidad.

Un detalle importante es que los trabajos comenzaron desde los -6 metros desde la superficie, todo esto través de excavaciones hasta que se llegara a dicha cota.

### **3.4.5. Parámetros de Vulnerabilidad.**

Una vez se identificó las zonas donde existen estratos licuables, el siguiente paso fue cuantificar y verificar que estos valores sean aceptados por la norma. El objetivo fijado fue un valor de asentamiento cercano a 5 centímetros.

#### **3.4.5.1. Resultados de Ensayos CPT.**

Se presenta a continuación parámetros de vulnerabilidad correspondiente al CPT1, con la finalidad se representar la magnitud de daños que podrán ser descritos en la ubicación del edificio.

El comportamiento del potencial de licuación es bajo, y los mayores valores se obtuvieron del método propuesto por Boulanger & Idriss, por lo tanto, se concluyó que son requeridos estudios de licuación con la finalidad de generar recomendaciones para el diseño de fundaciones a las estructuras vinculadas al proyecto.

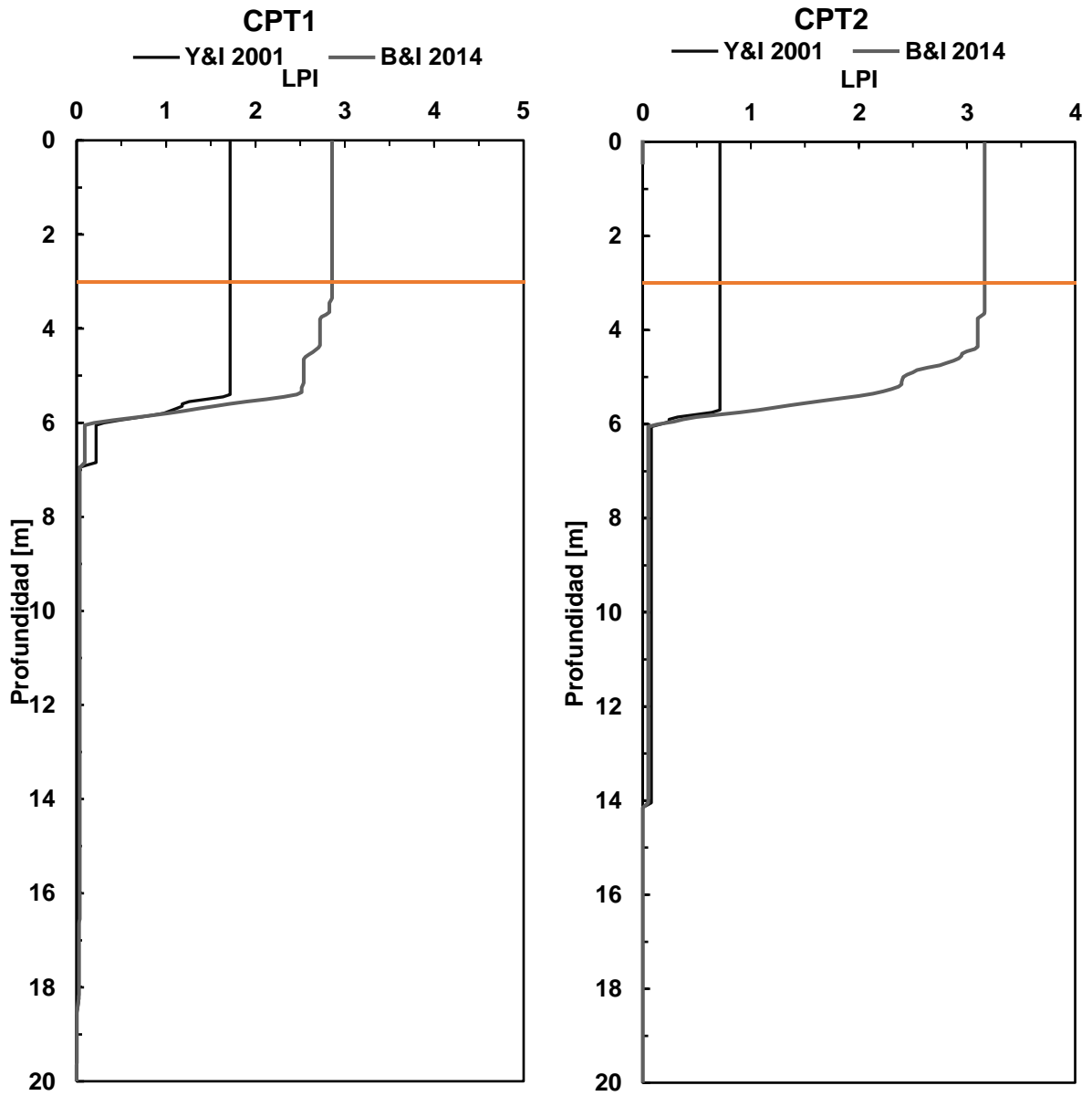


Ilustración 3.18 - CPT1 Y CPT2, parámetros de vulnerabilidad LPI.

Al igual que en el diseño de columnas de grava, se realizó el estudio para el potencial de licuación con las modificaciones realizadas por Ishihara [28], de esta forma considerar la influencia de las capas de suelo no licuables, en los daños sobre la superficie.

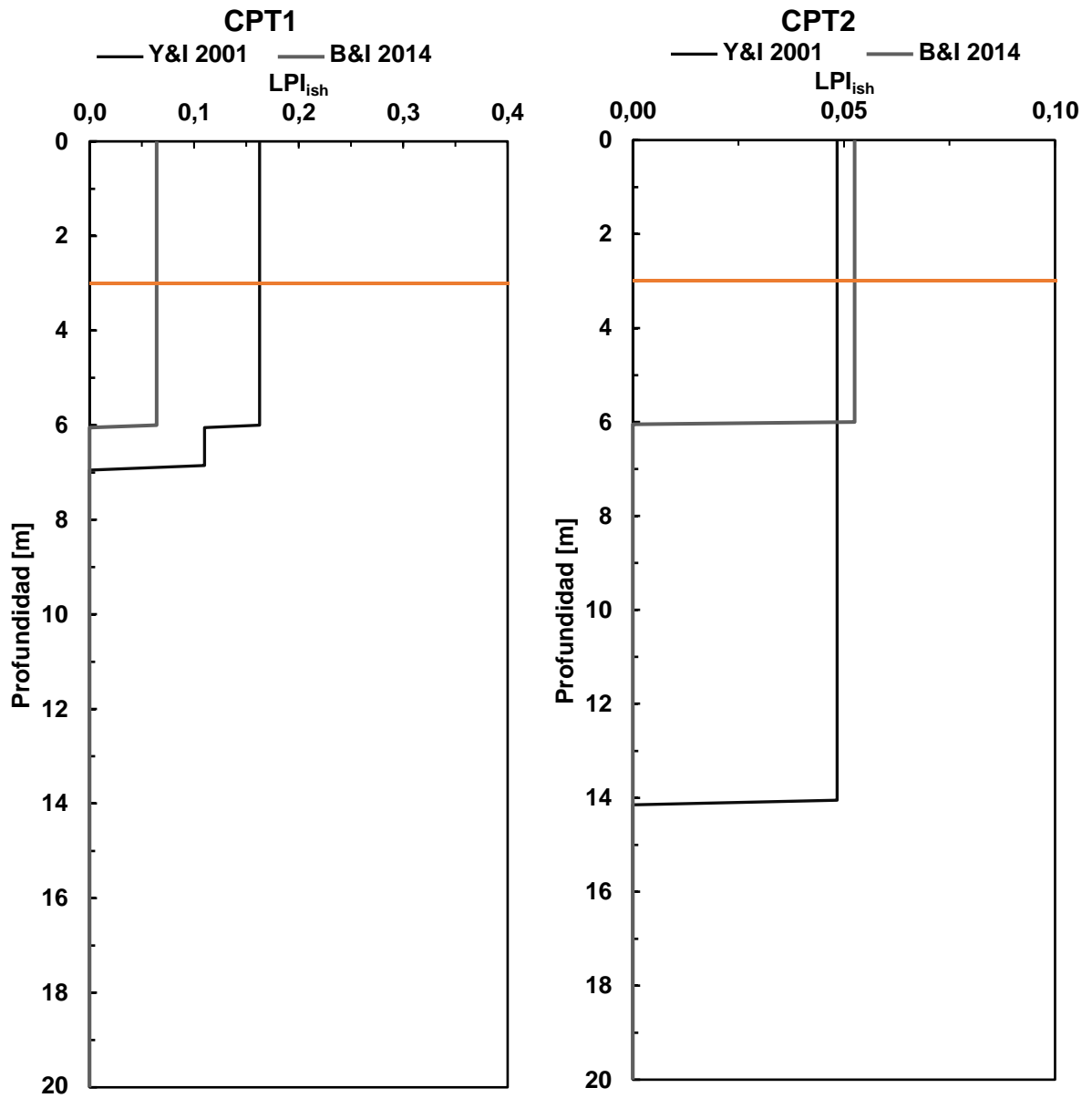
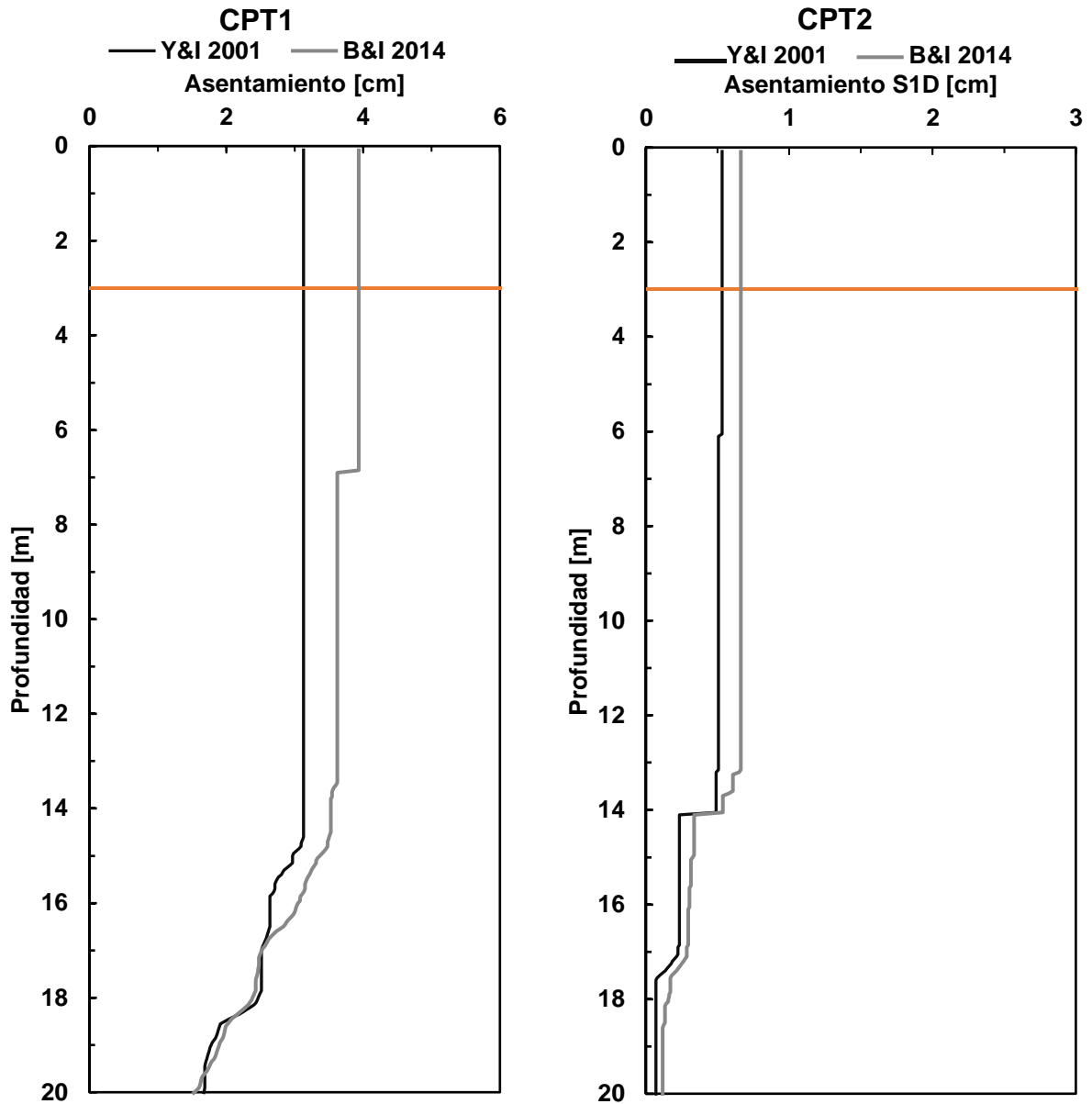


Ilustración 3.19 - CPT1 Y CPT2, parámetros de vulnerabilidad LPI corregido por Ishihara.

Se obtuvo valores cercanos al 0, de esta forma no se necesitarían estudios detallados de licuación, según los resultados de  $LPI_{ISH}$ .



*Ilustración 3.20 - CPT1 Y CPT2, casos de asentamiento de reconsolidación volumétrica.*

Una de las exigencias para el diseño fue regular las deformaciones verticales con un valor máximo de 5 centímetros. De esta forma se evitó la generación de movimientos laterales, la formación de grietas significativas y la expulsión de material arenoso. Todo esto a partir del acomodamiento del material granular debido a movimientos sísmicos. De acuerdo con lo anterior, el diseño quedó acotado por la aparición de grietas menores.

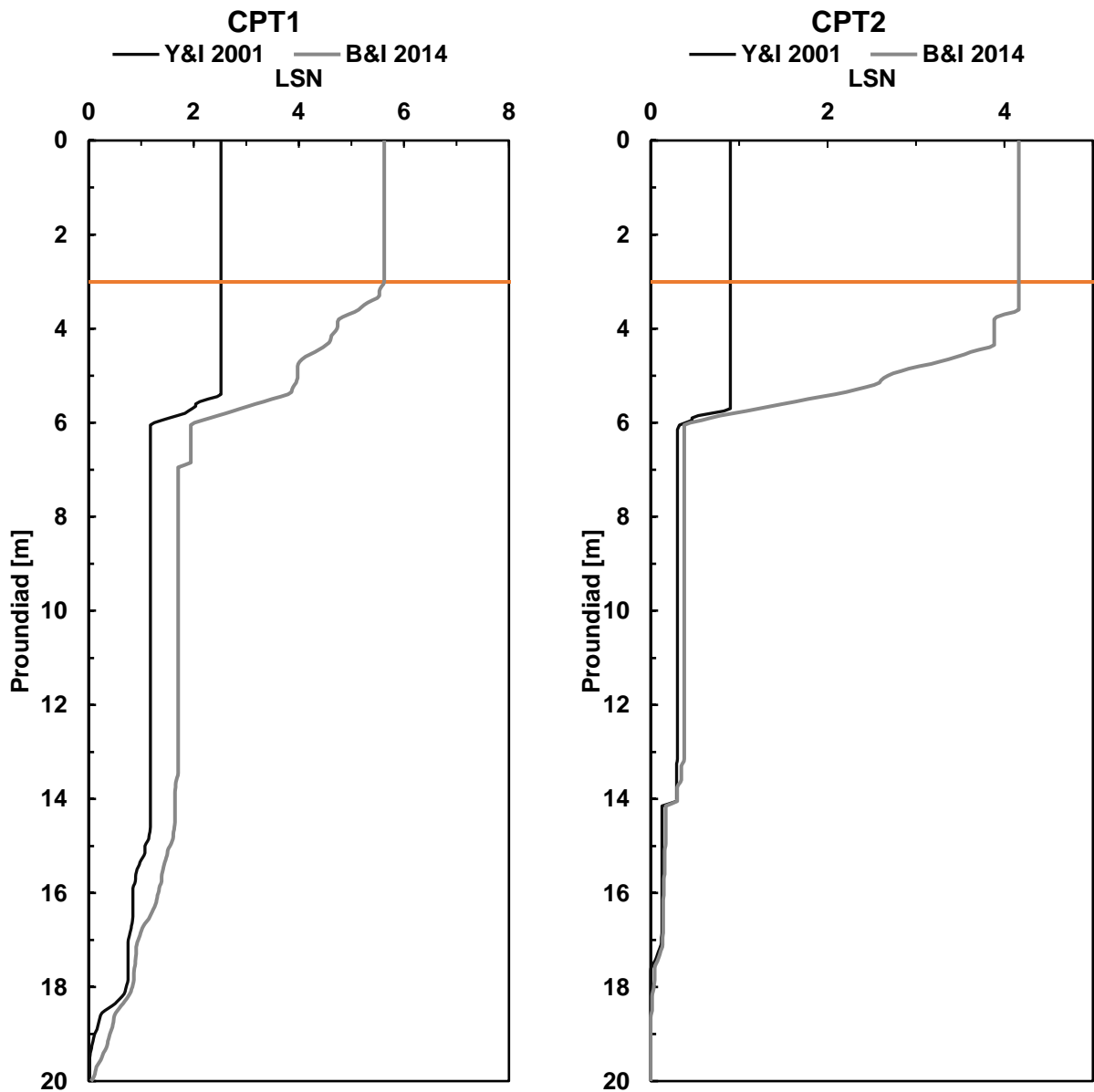


Ilustración 3.21 - CPT1 y CPT2, resultados asociados al número de severidad de licuación (LSN).

Adicionalmente, se realizó el análisis del número de severidad, para caracterizar la vulnerabilidad del suelo donde se ejecutan las columnas, para el proyecto Edificio 5 Oriente, en cuanto a los resultados, estos concluyeron en valores bajos, indican que, la licuación no lograra desarrollarse en el suelo, y tendrán algunos efectos menores, como grietas pequeñas.

En el cálculo de estos parámetros, tanto CPT1 como CPT 2 se consideró un criterio descrito por Cetin [36], que limita la profundidad de análisis a 20 metros, despreciando la influencia del suelo a una profundidad mayor a esta, en términos de su influencia en la superficie en caso de ocurrir licuación.

### **3.5. Comparaciones y Comentarios sobre Resultados Obtenidos.**

Los resultados expuestos para el caso de estudio, tanto en columnas de grava como en el sistema Deep soil mixing cumplen con los requerimientos para ser ejecutados como una solución para el proyecto. Con la finalidad de reducir el efecto de licuefacción en suelos principalmente arenosos.

Con el objetivo de abarcar y generar una idea más precisa sobre el alcance del DSM, se generaron mediante gráficos, comparaciones correspondientes a mejoras entre ambos métodos descritos en este trabajo de título y el suelo en su estado natural.

Se comenzó con el comportamiento que se generó para la sollicitación cíclica (CSR), se utilizó el mismo procedimiento, para la presentación de los gráficos. Divididos según el ensayo de penetración de cono (CPT1 y CPT2).

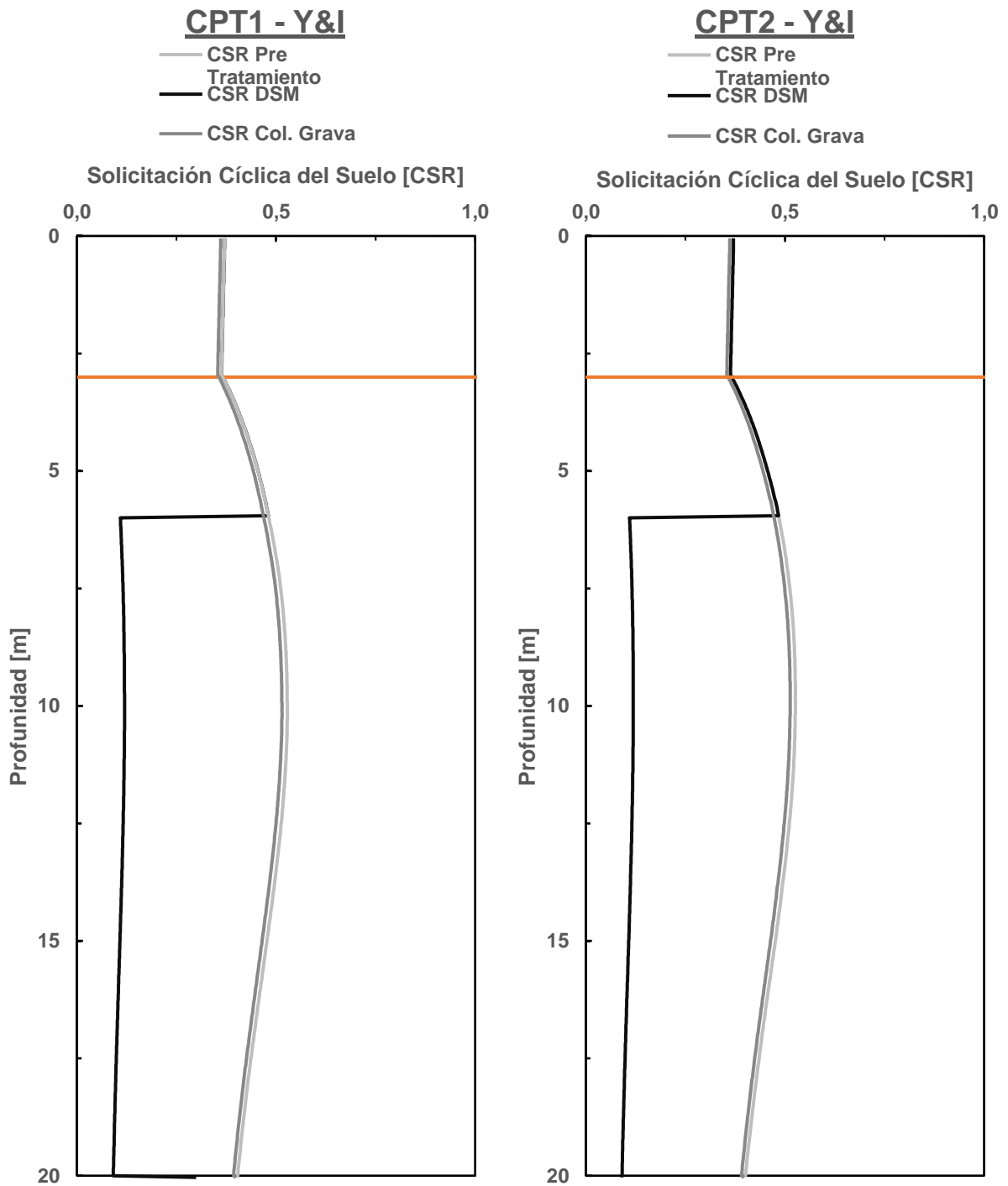


Ilustración 3.22 - Comparación de ensayos CPT, comportamiento de la sollicitación cíclica del suelo, caso Y&I.

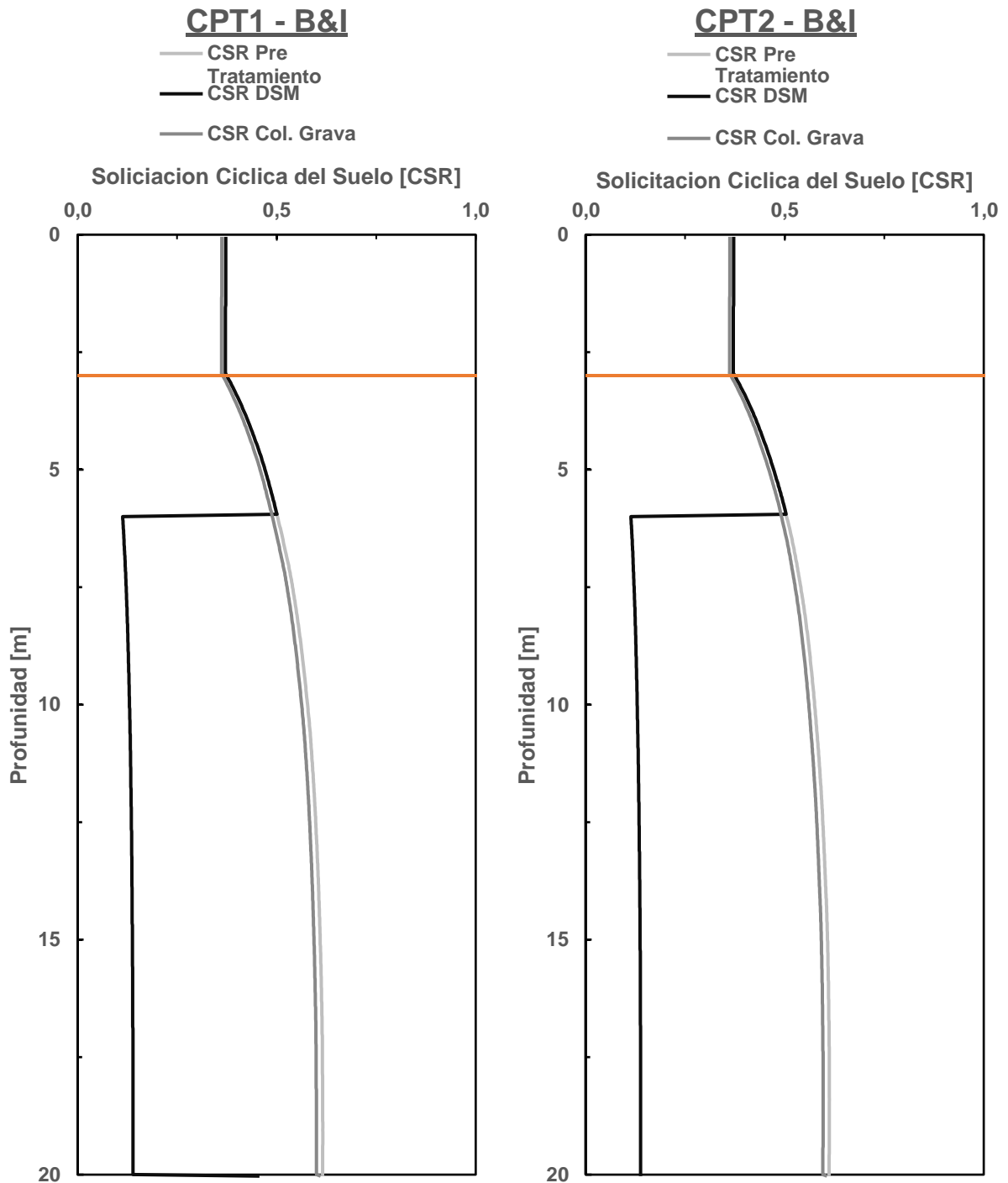


Ilustración 3.23 - Comparación de ensayos CPT, comportamiento de la sollicitación cíclica del suelo, caso B&I.

En términos generales se observó para ambos casos generados de los ensayos CPT, que la disminución de la sollicitación cíclica del suelo es reducida en mayor medida por el método DSM. Esto se pudo apreciar tanto para Y&I como en B&I. Otro indicador que se observó fue que el aporte del suelo sin considerar ningún tratamiento tuvo una magnitud similar al CSR aportado por columnas de grava.

A continuación, se presenta un cuadro resumen donde se muestra los valores máximos de reducción de CSR y el promedio de estos valores, entre los 6 a 20 metros de profundidad.

*Tabla 3.18 - Valores destacados de comparación de métodos, caso Y&I.*

<b>Y&amp;I</b>				
<b>CSR</b>	<b>CPT1</b>		<b>CPT2</b>	
	DSM	Col. Gravas	DSM	Col. Gravas
Promedio	0.110	0.473	0.109	0.472
Valor Mínimo	0.091	0.393	0.091	0.391

*Tabla 3.19 - Valores destacados de comparación de métodos, caso B&I.*

<b>B&amp;I</b>				
<b>CSR</b>	<b>CPT1</b>		<b>CPT2</b>	
	DSM	Col. Gravas	DSM	Col. Gravas
Promedio	0.133	0.574	0.133	0.572
Valor Mínimo	0.113	0.489	0.114	0.492

De esta forma se comprobó que disminución del parámetro CSR debido a densificación por parte de DSM es mayor entre los 6 a 20 metros.

Obteniéndose un promedio de 0.11 y 0.133 para Y&I y B&I respectivamente, mientras que el 0.47 y 0.57 de las columnas de gravas comparativamente, además los valores mínimos obtenidos para el DSM equivalen a un valor aproximado de 4.31 y 4.45 veces menor que los obtenidos para columnas de grava.

A continuación, se presentaron gráficos que representan el porcentaje de mejora del suelo natural con los métodos de mitigación de licuefacción presentados durante este trabajo de memoria.

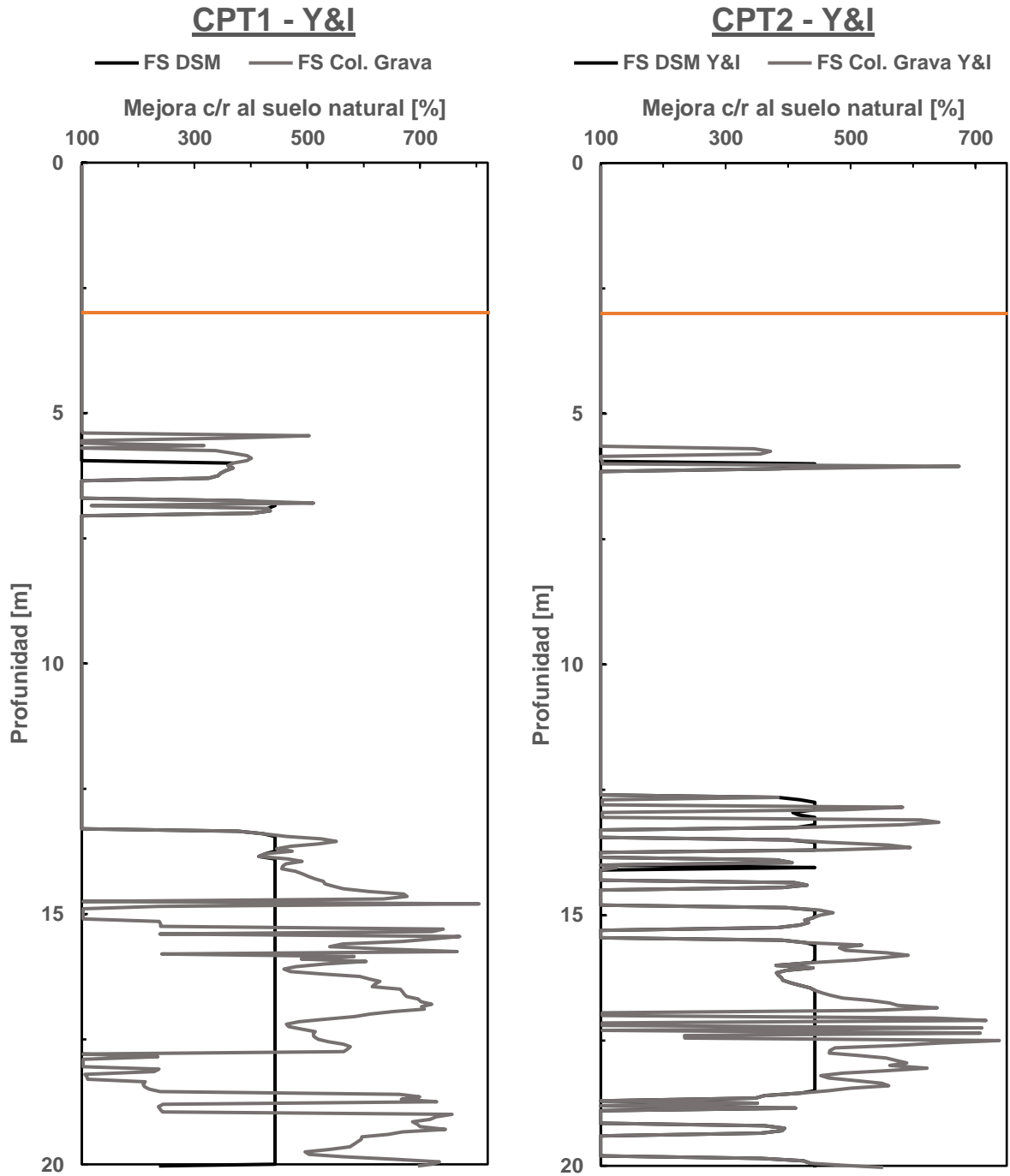


Ilustración 3.24 - Comparación ensayos CPT, mejora del F.S. según DSM y Columnas de grava, caso Y&I.

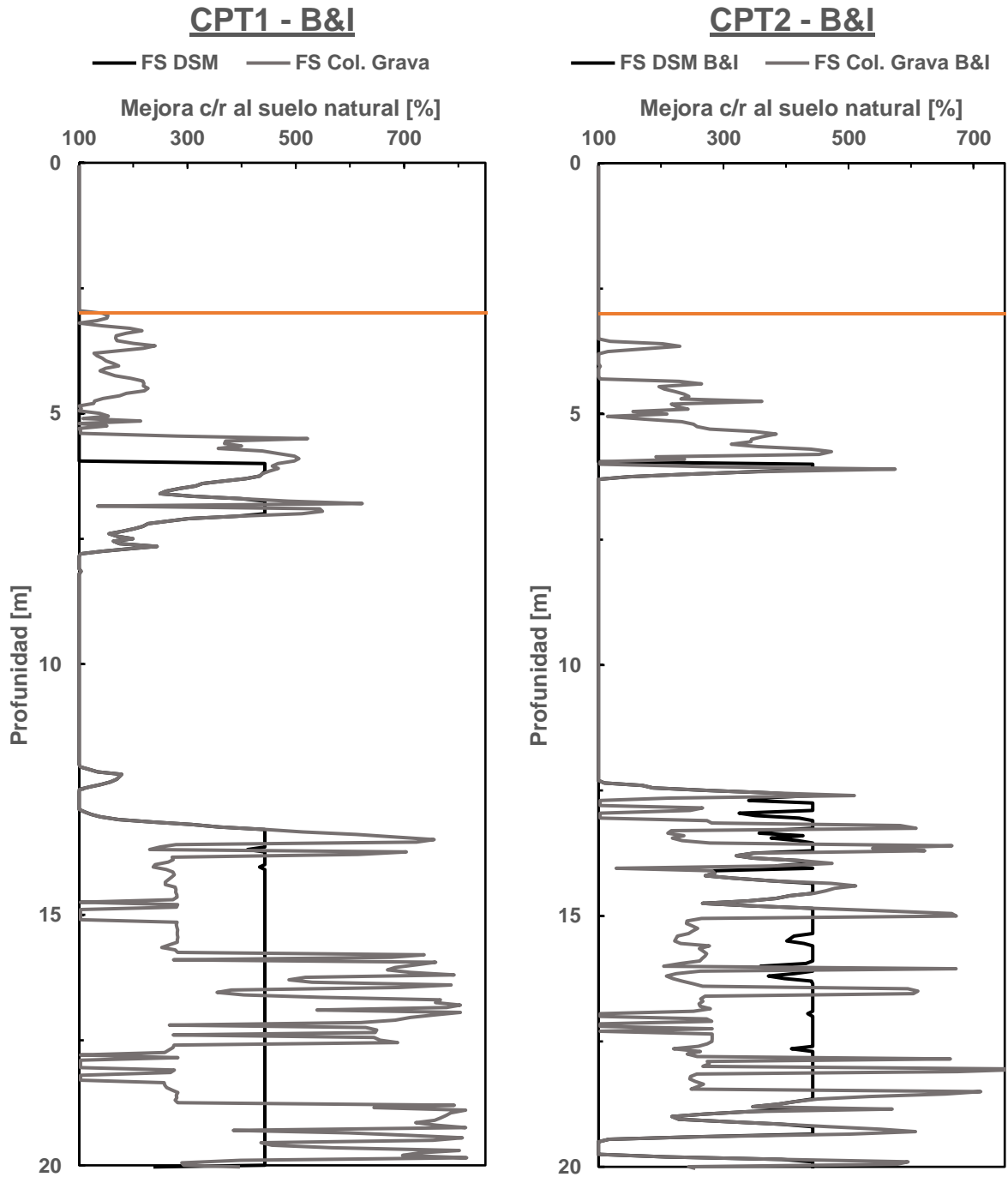


Ilustración 3.25 - Comparación ensayos CPT, mejora del F.S. según DSM y Columnas de grava, caso B&I.

En términos generales se apreció un aumento del factor de seguridad para ambos métodos, en algunos casos superior a 7 veces el original.

Además, se observó una mejora en el comportamiento de las columnas de grava, en gran parte se debió a que posee dos mecanismos para disminuir la licuefacción, uno es la rigidización y otro es la densificación, DSM solo cuenta con la rigidización.

Otro punto que merece ser mencionado, es que los sectores mejoras fueran las zonas descritas como potencialmente licuables en los estratos de suelos.

Otro aspecto que se comparó fueron los costos finales de cada diseño, a continuación, se presentó el resumen de la cotización para columnas de grava.

*Tabla 3.20 - cuadro resumen costos para diseño columnas de grava.*

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio Total [UF]</b>
Muro Berlines	m <sup>2</sup>	11.455,83
Movimiento de Tierras	m <sup>3</sup>	2.693,02
Columnas de Grava	un.	10.083,97
Gastos Generales	un.	1.412,84
<b>Total</b>		<b>25.645,66</b>

Para el diseño de las columnas de grava, se consideró un muro berlines con la finalidad de disminuir el volumen de tierra excavada. Además, para gastos generales se consideró movilización de equipo entre otros parámetros de logística.

De acuerdo con el costo total del método Deep Soil Mixing, presentado en Tabla 3.16 el cual obtuvo un costo final de 17.599,03 U.F. se considera que, para este proyecto ubicado en 5 oriente, el método DSM hubiese sido una opción viable. Pero en proyectos futuros debe realizarse la estimación realizada en esta memoria como una base, pero debe buscar una profundización mayor al momento de realizar el presupuesto.

## 4. Conclusiones

Los resultados obtenidos llevan a las siguientes conclusiones:

El método Deep soil mixing, tiene variadas aplicaciones, entre otras las siguientes: sistemas de contención, tratamiento de suelos, refuerzo para fundaciones, muros impermeables, remediación medio ambiental, mitigación de licuación.

La investigación realizada abre el camino para investigar la viabilidad de implementarlo en el futuro como solución para otros tipos de problemas, sobre suelo chileno.

Al comparar los métodos de Deep Soil Mixing y Columnas de grava, se encontró, a través de resultados, que la rigidización del suelo que proporciona el Deep soil mixing, reduce el valor de CSR en mayor medida que las columnas de grava, cuyo costo en este caso fue superior.

Las columnas de grava desarrollan un mecanismo adicional, que es la densificación del suelo, lo que aumenta el CRR, y de esta forma compensa la diferencia generada por la rigidización que proporciona el Deep Soil Mixing.

El análisis de las columnas de DSM realizado demuestra que es un método versátil y que además se puede adaptar fácilmente a los requerimientos de un proyecto dado.

El diseño de columnas secante desarrollado en este trabajo para formar paneles de Deep Soil Mixing, y de esta forma mitigar la licuación producida en suelos licuables fue muy eficaz, ya que demostró esto a través de los parámetros de vulnerabilidad, los que indican que la estructura no presentara grandes daños, además de acotar el asentamiento a menos de 5 centímetros.

El diseño adicional de columnas de grava de este trabajo muestra también resultados aptos para mitigar de forma considerable los efectos de una licuación, resultado de un sismo importante.

Como resultado del análisis de costos, el precio del Deep Soil Mixing es muy sensible al precio del cemento por sacos, elevándose de forma muy rápida, lo que lleva a concluir que la solución para este método de estabilización de suelos requiere el uso de hormigón producido en una planta.

Los precios unitarios para el Deep Soil Mixing, se plantearon en términos generales y no se detalló algunos aspectos específicos que constituyen información clasificada de Ferrara, y que no puede ser proporcionada al estudiante razón por la cual los valores presentados, si bien son representativos solo deben considerarse como referenciales.

A pesar de todo, se debe destacar que el método es sencillo de ejecutar en obra, que el diseño es similar al de las columnas de grava, en otras palabras, es una solución sencilla de diseñar.

Los resultados obtenidos indican también que vale la pena adaptar el Deep Soil Mixing a los requerimientos y condiciones de los problemas que enfrenta la ingeniería chilena y que puede competir en muchos casos con las columnas de grava, donde los suelos presenten entre 15-20% de finos (15-20% pasa la malla N°200), materiales cuya densificación es, en general, dificultosa.

Para el proyecto de la calle 5 oriente favoreció la elección del Deep Soil Mixing por presentar el presupuesto más económico porque en este caso concurren muchos factores que llevaron a la reducción de costos como: un mejor costo en el arriendo de equipos, disponibilidad de equipos especiales concernientes al DSM solo citando algunos.

## 5. Bibliografía

- [1] G. Vukotić, “Deep soil mixing. Estabilización Profunda con Columnas de Cal-Cemento en Vía Seca”, Barcelona, 2007, pp. 135-155.
- [2] Soil Mixing/Mezcla de Suelos, Keller, Cataluña, España.
- [3] M. Kitazume & M. Terashi, “The Deep Mixing Method”. Boca Ratón, Florida, Editorial: CRC Press. 2013.
- [4] R. M. Thorson, “La Falla Geológica Marga – Marga, Viña del Mar – Chile”. UTFSM, Departamento de Obras Civiles, Valparaíso.1999.
- [5] A. P. Prada, “Mejoramiento del Terreno con Columnas de Grava por Vibrosustitución”, Memoria de Titulación, UTFSM, Valparaíso, 2012.
- [6] Bauer, “SCM and SCM-DH: Single Column Mixing”, Germany.
- [7] D. Foundations Institute (DFI) Soil Mixing Committee, “Guidelines for Soil Mixing”, New Jersey, USA, 2016.
- [8] M. P. Moseley & K. Kirsch, “Ground Improvement”, Editorial: Spon Press, 2004.
- [9] K. Kirsch & A. Bell, “Ground Improvement”, Boca Ratón, Florida. Editorial: CRC Press. 2013.
- [10] F. Highway Administration, “An Introduction to the Deep Soil Mixing Methods as Used in Geotechnical Applications”, U.S. Department of Transportation.
- [11] Keller, “Deep Soil Mixing (DSM) Improvement of weak soils by the DSM method”, Madrid, España.
- [12] Bauer Maschinen GmbH, “Single Column Mixing Method Statement”, Germany, 2018.
- [13] Bauer Maschinen GmbH, “SCM and SCM-DH Single Column Mixing”, Germany, 2017.
- [14] F. W. Gerresen, “Single Column Mixing-Double Rotary Head (SCM-DRH)-First Experiences with a New Soil Mixing Tool”, ASCE library, 2017, pp. 405-414.
- [15] G. Filz.T. Adams, M. Navin, A. Templeton, “Design of Deep Mixing for Support of Levees and Floodwalls” in Grouting and Deep Mixing: 4th International 216 Conference on Grouting and Deep Mixing, Reston, Virginia, USA, 2012, pp. 89 -133.
- [16] D. A. Bruce, “Introduction to the Deep Mixing Method as Used in Geotechnical Applications, Volume III: Verification and Properties of Treated Soil”, Federal Highway Administration, Washington DC, 2001.
- [17] T. V. Nguyen, D. Rayamajhi, R.W. Boulanger, S. A. Ashford, J.Lu, A. Elgamal y L. Shao, “Design of DSM Grids for Liquefaction Remediation”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, noviembre, 2013.
- [18] A. D. Guzmán & J. M. Fernández, “Estado del Arte Diseño de Columnas de Grava para Mitigación de Licuación”, Pilotes Terratest – Terra Foundations, 2018.

- [19] F. Kuncar, "Efectos de la Licuación de Suelos en Edificios y Mitigación mediante Columnas de Grava", FERRARA, Santiago, Chile, 2020.
- [20] N. J. Guerrero, "Análisis Comparativo de Metodologías de Evaluación de la Licuación de Suelos y Recomendación para su Aplicación en Chile, para las mediciones in situ SPT, CPT y Vs", Memoria de Titulación, UTFSM, Valparaíso ,2020.
- [21] P. K. Robertson & C. E. Wride, "Evaluating cyclic liquefaction potencial using the cone penetration test", Can Geotech J., Vol.35: pp. 442-459, Canada, 1998.
- [22] H.B. Seed and I. M. Idriss, "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potencial" J. Geotech, ASCE, -vol.97: pp.1249 – 1273,1971.
- [23] P. Carneros and J. Javier, "Pilotes en Terrenos Licuables. Mitigación de Licuefaccion Mediante la Tecnica Deep Mixing Method" Master en Mecánica de suelos e ingeniería geotécnica, CEDEX, Madrid, España, 2016.
- [24] I. M. Idriss and T. L. Youd, "Liquefaction resistance of soils:Summary report from the 1996 nceer and 1998nceer/nsf workshop on evaluation of liquefaction resistance of soil", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, pages pp.297-313,2001.
- [25] R.W. Boulanger and I. M. Idriss, "CPT and SPT based liquefaction triggering procedures", Technical Report, University of California at Davis, United States, 2014.
- [26] P. K. Robertson and K. L. Cabal, "Guide to cone penetration testing for Geotechnical Engineering", Gregg Drilling& Testing, Inc., California, United States, 2014.
- [27] T. Iwasaki,K. Tokida & F. Tatsuoka, "Soil Liquefaction Potencial Evaluation with Use of the Simplified Procedure", International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Eneieering and Soil Dinamics,Missouri University of Science and Technology, St. Louis, Missouri,1981.
- [28] R. A. Green, B.W. Maurer and O.S. Taylor, "Moving Towards an Improved index for assessing liquifaction Hazard: Lessons from Historical Data", ELSEVIER, Vol.55: pp. 778-787, 2015.
- [29] G. Zhang, P. Robertson and R. Brachman , "Estimating Liquefaction-Induced Ground Settlement from CPT for Level Ground", NRC Researh Press, Canada,2002.
- [30] Tonkin & Taylor Ltd, "Liquefaction Vulnerability Study", report prepare for: Earthquake Commission,2013.
- [31] Z. Ben Zalem, W. Frickha and M. Bouassida, "Densification effect on Liquefaction potencial of Reinforced Soil by Stone Columns", 19th International conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul,2017.
- [32] D. Rayamajhi, S Ashford, R. Boulanger and A. Elgamal, "Dense Granular Columns in Liquefiable Ground. I: Shear Reinforcement and Cyclic Stress Ratio Reduction", J. Geotech. Geenviron. Eng, University California, California, 2016.
- [33] J. I. Baez and G. Martin, "Advances in th eDesign of Vibro Systems for the Improvement of Liquefaction Resistance", The Vancouver Geotechnical Society, 1993.
- [34] H. J. Priebe, "Vibro Replacement to Prevent Earthquake Induced Liquefaction", Ground Engineering, United Kingdom,1998.

- [35] Ferrara – Proyectos Especiales, “Informe de Mecánica de Suelos, Edificio 5 Oriente, Viña del Mar, Región de Valparaíso”, Ñuñoa, Santiago, 2020.
- [36] A. Kiureghian, K. Tokimatsu, L. Harder, R.Kayen, K. Cetin, R. Seed and E. Moss, “Standart penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil Liquefaction potencial”, Journal of Geotechnical and geonvironmental Engineering, Vol.130: pp 1314 – 1340, 2004.
- [37] R.E Kayen, J.P.Stewart, A.Der Kiureghain, R.E.S. Moss, R.B. Seed & K.O. Cetin, “Cpt-based probabilistic and deterministic assesment if in situ seismic soil liquefaction potencial”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.132(8): pp.1032-1051,2006.
- [38] J. Han, “Principes and Practice of Ground Improvement”, Editorial: Wiley, 2015.
- [39] BRE, UK, “Design Guide: Soft Soil Stabilisation”, Editorial: IHS BRE Press, 2002.
- [40] D. D. Correa, “Jet Grouting para el Mejoramiento de Suelos”, Memoria de Titulacion, UTFSM, Valparaíso,2009
- [41] N. J. Guerrero, “Análisis Comparativo de Metodologías de Evaluación de la Licuación de Suelos y Recomendación para su Aplicación en Chile, para las mediciones in situ SPT, CPT y Vs”, Memoria de Titulación, UTFSM, Valparaíso ,2020.
- [42] G. Aguilar, “Análisis Comparativo de Capacidad de Carga Axial Última y Lateral para Pilotes de Desplazamiento Total en Arenas Medias”, Magister en Ingeniería Estructural y Geotécnica, Santiago, Chile.
- [43] M. Lew, L. Shao, M.B. Hudson & M.A. Muprhy, “Mitigation of Soil Liquefaction by Deep Soil Mixing for Hospitals”, en Conf. On Earthquake Engineering, Anchorage, Alasaka, 2014.
- [44] F. W. Gerressen, “Reraining Systems in Urban Excavations”, en Congreso Internacional de Fundación Profundas de Bolivia, Santa Cruz – Bolivia, 2019.
- [45] D. Vinay Kumar, “Ground Improvement Techniques for Liquefaction Remediation near Exsisting Life Lines”, Department of Civil Engineering, Rajiv Gandhi University of Knowledge Technologies, Basar, India, 2015.
- [46] B. M. Das, “Fundamentos de la ingeniería de cimentaciones”. Editorial: Cengage Learning. 2012.
- [47] L. Gonzales de Vallejo, “Ingeniería Geológica”, Editorial: Pearson Educación, 2002.
- [48] T. W. Lambe, R. V. Whitman, “Mecánica de Suelos”, Editorial: Limusa, 2004.

## 6. Anexo

### A. Parámetros de Diseño Columnas de Grava.

Youd & Idriss

Profundidad [m]	s [kPa]	s' [kPa]	qc [kPa]	rd	Fr [%]	FC%	n1	Qt1	lc1	n2	Qt2
5,50	103,96	78,97	12530,00	0,96	0,87	3,48	1,00	157,36	1,72	0,50	140,30
5,55	104,90	79,42	14540,00	0,96	0,44	0,00	1,00	181,77	1,49	0,50	162,35
5,60	105,84	79,87	14620,00	0,96	0,49	0,00	1,00	181,72	1,52	0,50	162,78
5,65	106,78	80,32	14270,00	0,96	0,43	0,00	1,00	176,34	1,49	0,50	158,44
5,70	107,70	80,75	14870,00	0,96	0,31	0,00	1,00	182,82	1,40	0,50	164,66
5,75	108,66	81,22	13890,00	0,96	0,67	0,00	1,00	169,69	1,62	0,50	153,36
5,80	109,58	81,65	13550,00	0,96	0,36	0,00	1,00	164,61	1,47	0,50	149,21
5,85	110,51	82,09	13240,00	0,96	0,43	0,00	1,00	159,94	1,53	0,50	145,41
5,90	111,44	82,53	13190,00	0,96	0,43	0,00	1,00	158,47	1,53	0,50	144,47
5,95	112,36	82,96	13350,00	0,96	0,35	0,00	1,00	159,57	1,48	0,50	145,85
6,00	113,28	83,39	13780,00	0,96	0,33	0,00	1,00	163,90	1,46	0,50	150,16
6,05	114,18	83,80	13960,00	0,96	0,25	0,00	1,00	165,23	1,39	0,50	151,74
6,10	115,07	84,20	13870,00	0,96	0,20	0,00	1,00	163,37	1,36	0,50	150,41
6,15	115,95	84,59	14130,00	0,96	0,19	0,00	1,00	165,66	1,35	0,50	152,87
6,20	116,85	85,00	14330,00	0,96	0,21	0,00	1,00	167,21	1,36	0,50	154,66
6,25	117,75	85,41	14440,00	0,96	0,22	0,00	1,00	167,69	1,37	0,50	155,47
6,30	118,65	85,82	14800,00	0,96	0,24	0,00	1,00	171,06	1,38	0,50	158,96
6,35	119,56	86,24	15360,00	0,95	0,24	0,00	1,00	176,72	1,36	0,50	164,58
6,40	120,48	86,67	15890,00	0,95	0,25	0,00	1,00	181,96	1,36	0,50	169,84
6,45	121,39	87,09	16090,00	0,95	0,26	0,00	1,00	183,35	1,37	0,50	171,56
6,50	122,31	87,52	16510,00	0,95	0,27	0,00	1,00	187,24	1,36	0,50	175,60

Baez 1995												
lc2	n3	Qt3	lc	CQ	qc1N	Kc	qc1N*Kc	FR < 1	1 < FR < 1,5	1,5 < FR < 2	2 < FR < 2,5	n1
1,76	0,50	140,30	1,76	1,13	140,30	1,08	151,11	1,43	1,20	1,00	1,00	1,43
1,53	0,50	162,35	1,53	1,13	162,35	1,00	162,35	1,35	1,15	1,00	1,00	1,35
1,56	0,50	162,78	1,56	1,12	162,78	1,00	162,78	1,35	1,15	1,00	1,00	1,35
1,53	0,50	158,44	1,53	1,12	158,44	1,00	158,44	1,38	1,17	1,00	1,00	1,38
1,44	0,50	164,66	1,44	1,12	164,66	1,00	164,66	1,34	1,14	1,00	1,00	1,34
1,66	0,50	153,36	1,66	1,12	153,36	1,01	154,75	1,40	1,19	1,00	1,00	1,40
1,51	0,50	149,21	1,51	1,11	149,21	1,00	149,21	1,44	1,21	1,00	1,00	1,44
1,56	0,50	145,41	1,56	1,11	145,41	1,00	145,41	1,47	1,23	1,00	1,00	1,47
1,56	0,50	144,47	1,56	1,11	144,47	1,00	144,47	1,48	1,24	1,00	1,00	1,48
1,51	0,50	145,85	1,51	1,10	145,85	1,00	145,85	1,47	1,23	1,00	1,00	1,47
1,49	0,50	150,16	1,49	1,10	150,16	1,00	150,16	1,44	1,21	1,00	1,00	1,44
1,43	0,50	151,74	1,43	1,10	151,74	1,00	151,74	1,43	1,20	1,00	1,00	1,43
1,39	0,50	150,41	1,39	1,10	150,41	1,00	150,41	1,43	1,21	1,00	1,00	1,43
1,38	0,50	152,87	1,38	1,09	152,87	1,00	152,87	1,42	1,20	1,00	1,00	1,42
1,39	0,50	154,66	1,39	1,09	154,66	1,00	154,66	1,41	1,19	1,00	1,00	1,41
1,40	0,50	155,47	1,40	1,09	155,47	1,00	155,47	1,40	1,18	1,00	1,00	1,40
1,41	0,50	158,96	1,41	1,08	158,96	1,00	158,96	1,38	1,17	1,00	1,00	1,38
1,39	0,50	164,58	1,39	1,08	164,58	1,00	164,58	1,34	1,14	1,00	1,00	1,34
1,39	0,50	169,84	1,39	1,08	169,84	1,00	169,84	1,31	1,12	1,00	1,00	1,31
1,39	0,50	171,56	1,39	1,08	171,56	1,00	171,56	1,30	1,11	1,00	1,00	1,30
1,39	0,50	175,60	1,39	1,07	175,60	1,00	175,60	1,28	1,09	1,00	1,00	1,28

n	qcmax	qc1N cs	Dr [%]	Ks	MSF	Ka	CSR	CRR 7.5	CRR	FS
1,43	300,00	216,02	62,79	1,00	0,66	1,00	0,46	10	6,64	2,00
1,35	300,00	219,98	66,70	1,00	0,66	1,00	0,46	10	6,64	2,00
1,35	300,00	220,12	66,77	1,00	0,66	1,00	0,46	10	6,64	2,00
1,38	300,00	218,65	66,04	1,00	0,66	1,00	0,46	10	6,64	2,00
1,34	300,00	220,74	67,07	1,00	0,66	1,00	0,46	10	6,64	2,00
1,40	300,00	217,35	65,16	1,00	0,66	1,00	0,46	10	6,64	2,00
1,44	300,00	215,31	64,43	1,00	0,66	1,00	0,46	10	6,64	2,00
1,47	300,00	213,84	63,73	1,00	0,66	1,00	0,47	10	6,64	2,00
1,48	300,00	213,47	63,56	1,00	0,66	1,00	0,47	10	6,64	2,00
1,47	300,00	214,01	63,81	1,00	0,66	1,00	0,47	10	6,64	2,00
1,44	300,00	215,66	64,58	1,00	0,66	1,00	0,47	10	6,64	2,00
1,43	300,00	216,25	64,86	1,00	0,66	1,00	0,47	10	6,64	2,00
1,43	300,00	215,76	64,62	1,00	0,66	1,00	0,47	10	6,64	2,00
1,42	300,00	216,67	65,06	1,00	0,66	1,00	0,47	10	6,64	2,00
1,41	300,00	217,31	65,37	1,00	0,66	1,00	0,47	10	6,64	2,00
1,40	300,00	217,61	65,50	1,00	0,66	1,00	0,48	10	6,64	2,00
1,38	300,00	218,83	66,10	1,00	0,66	1,00	0,48	10	6,64	2,00
1,34	300,00	220,71	67,02	1,00	0,66	1,00	0,48	10	6,64	2,00
1,31	300,00	222,39	67,87	1,00	0,66	1,00	0,48	10	6,64	2,00
1,30	300,00	222,93	68,13	1,00	0,66	1,00	0,48	10	6,64	2,00
1,28	300,00	224,15	68,75	1,00	0,66	1,00	0,48	10	6,64	2,00

Boulangier & Idriss



## B. Parámetros de Diseño DSM

Youd & Idriss

Prof[m]	s [kPa]	s' [kPa]	qc [kpa]	rd	Fr [%]	n1	Qt1	lc1	n2
5,5	103,96	78,97	12530,00	0,96	0,87	1,00	157,36	1,72	0,50
5,55	104,90	79,42	14540,00	0,96	0,44	1,00	181,77	1,49	0,50
5,6	105,84	79,87	14620,00	0,96	0,49	1,00	181,72	1,52	0,50
5,65	106,78	80,32	14270,00	0,96	0,43	1,00	176,34	1,49	0,50
5,7	107,70	80,75	14870,00	0,96	0,31	1,00	182,82	1,40	0,50
5,75	108,66	81,22	13890,00	0,96	0,67	1,00	169,69	1,62	0,50
5,8	109,58	81,65	13550,00	0,96	0,36	1,00	164,61	1,47	0,50
5,85	110,51	82,09	13240,00	0,96	0,43	1,00	159,94	1,53	0,50
5,9	111,44	82,53	13190,00	0,96	0,43	1,00	158,47	1,53	0,50
5,95	112,36	82,96	13350,00	0,96	0,35	1,00	159,57	1,48	0,50
6	113,28	83,39	13780,00	0,96	0,33	1,00	163,90	1,46	0,50
6,05	114,18	83,80	13960,00	0,96	0,25	1,00	165,23	1,39	0,50
6,1	115,07	84,20	13870,00	0,96	0,20	1,00	163,37	1,36	0,50
6,15	115,95	84,59	14130,00	0,96	0,19	1,00	165,66	1,35	0,50
6,2	116,85	85,00	14330,00	0,96	0,21	1,00	167,21	1,36	0,50
6,25	117,75	85,41	14440,00	0,96	0,22	1,00	167,69	1,37	0,50
6,3	118,65	85,82	14800,00	0,96	0,24	1,00	171,06	1,38	0,50
6,35	119,56	86,24	15360,00	0,95	0,24	1,00	176,72	1,36	0,50
6,4	120,48	86,67	15890,00	0,95	0,25	1,00	181,96	1,36	0,50
6,45	121,39	87,09	16090,00	0,95	0,26	1,00	183,35	1,37	0,50
6,5	122,31	87,52	16510,00	0,95	0,27	1,00	187,24	1,36	0,50

Qt2	lc2	n3	Qt3	lc3	Cq	q1cN	Kc	(qc1N)cs	Dr [%]
140,30	1,76	0,50	140,30	1,76	1,13	140,30	1,08	151,11	
162,35	1,53	0,50	162,35	1,53	1,13	162,35	1,00	162,35	
162,78	1,56	0,50	162,78	1,56	1,12	162,78	1,00	16	
158,44	1,53	0,50	158,44	1,53	1,12	158,44	1,00		
164,66	1,44	0,50	164,66	1,44	1,12	164,66	1,0		
153,36	1,66	0,50	153,36	1,66	1,12	153,36			
149,21	1,51	0,50	149,21	1,51	1,11	149,2			
145,41	1,56	0,50	145,41	1,56	1,11				
144,47	1,56	0,50	144,47	1,56	1,11				
145,85	1,51	0,50	145,85	1,51					
150,16	1,49	0,50	150,16	1,49					
151,74	1,43	0,50	151,74						
150,41	1,39	0,50	150,41						
152,87	1,38	0,50							15
154,66	1,39	0,50							
155,47	1,40	0,5							
158,96	1,41								
164,58	1,39								
169,84									
171,56									

Boulanger & Idriss

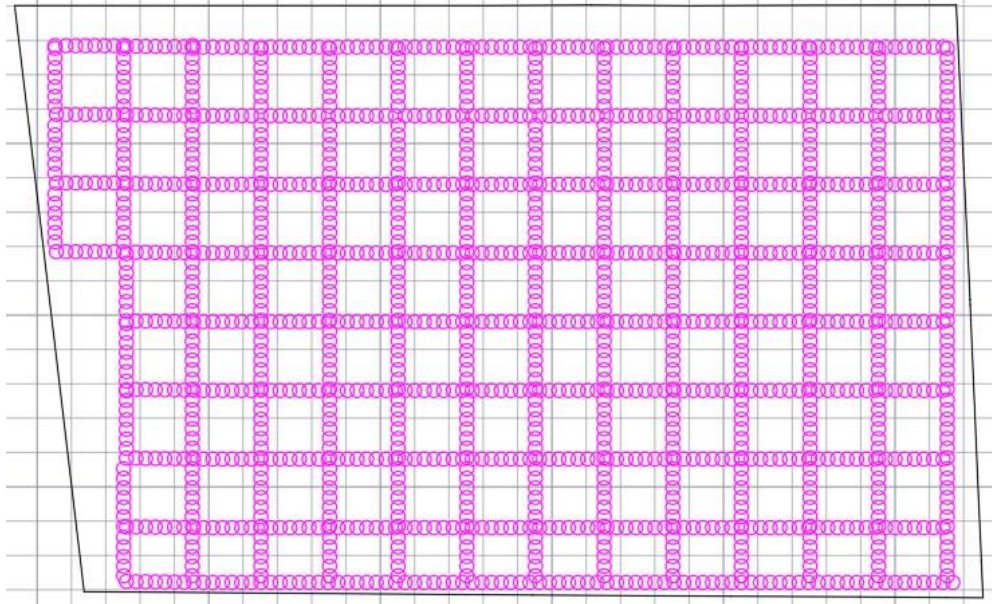
Prof[m]	s [kPa]	s' [kPa]	a(z)	b(z)	rd	Fc [%]	lc	qc [kpa]
5,50	103,96	78,97	-0,30	0,03	1,00	3,48	1,76	12530,00
5,55	104,90	79,42	-0,31	0,03	1,00	0,00	1,53	14540,00
5,60	105,84	79,87	-0,31	0,04	1,00	0,00	1,56	14620,00
5,65	106,78	80,32	-0,31	0,04	1,00	0,00	1,54	14270,00
5,70	107,70	80,75	-0,32	0,04	1,00	0,00	1,45	14870,00
5,75	108,66	81,22	-0,32	0,04	1,00	0,00	1,66	13890,00
5,80	109,58	81,65	-0,33	0,04	1,00	0,00	1,52	13550,00
5,85	110,51	82,09	-0,33	0,04	1,00	0,00	1,57	13240,00
5,90	111,44	82,53	-0,33	0,04	1,00	0,00	1,57	13190,00
5,95	112,36	82,96	-0,34	0,04	1,00	0,00	1,52	13350,00
6,00	113,28	83,39	-0,34	0,04	1,00	0,00	1,50	13780,00
6,05	114,18	83,80	-0,34	0,04	1,00	0,00	1,43	13960,00
6,10	115,07	84,20	-0,35	0,04	1,00	0,00	1,40	13870,00
6,15	115,95	84,59	-0,35	0,04	1,00	0,00	1,39	14130,00
6,20	116,85	85,00	-0,36	0,04	1,00	0,00	1,40	14330,00
6,25	117,75	85,41	-0,36	0,04	1,00	0,00	1,41	14440,00
6,30	118,65	85,82	-0,36	0,04	1,00	0,00	1,41	14800,00
6,35	119,56	86,24	-0,37	0,04	1,00	0,00	1,40	15360,00
6,40	120,48	86,67	-0,37	0,04	1,00	0,00	1,39	15890,00
6,45	121,39	87,09	-0,38	0,04	1,00	0,00	1,40	16090,00
6,50	122,31	87,52	-0,38	0,04	1,00	0,00	1,39	16510,00

m	CN	qc1N	$\Delta$ qc1N	qc1N cs	Cs	Ks	MSF max	MSF
0,42	1,11	137,71	0,01	137,71	0,14	1,04	1,54	0,80
0,39	1,10	158,12	0,00	158,12	0,17	1,04	1,77	0,72
0,39	1,10	158,60	0,00	158,60	0,17	1,04	1,77	0,72
0,40	1,09	154,69	0,00	154,69	0,17	1,04	1,72	0,73
0,39	1,09	160,53	0,00	160,53	0,18	1,04	1,80	0,71
0,40	1,09	150,15	0,00	150,15	0,16	1,03	1,67	0,75
0,41	1,09	146,36	0,00	146,36	0,15	1,03	1,63	0,77
0,42	1,09	142,87	0,00	142,87	0,15	1,03	1,59	0,78
0,42	1,09	142,06	0,00	142,06	0,15	1,03	1,58	0,79
0,41	1,08	143,41	0,00	143,41	0,15	1,03	1,60	0,78
0,41	1,08	147,51	0,00	147,51	0,16	1,03	1,64	0,76
0,40	1,08	149,07	0,00	149,07	0,16	1,03	1,66	0,76
0,41	1,08	147,88	0,00	147,88	0,16	1,03	1,64	0,76
0,40	1,07	150,26	0,00	150,26	0,16	1,03	1,67	0,75
0,40	1,07	152,01	0,00	152,01	0,16	1,03	1,69	0,75
0,40	1,07	152,85	0,00	152,85	0,16	1,03	1,70	0,74
0,39	1,07	156,22	0,00	156,22	0,17	1,03	1,74	0,73
0,38	1,06	161,61	0,00	161,61	0,18	1,03	1,81	0,70
0,38	1,06	166,67	0,00	166,67	0,19	1,03	1,88	0,68
0,37	1,06	168,39	0,00	168,39	0,19	1,03	1,91	0,67
0,37	1,05	172,32	0,00	172,32	0,20	1,03	1,97	0,64

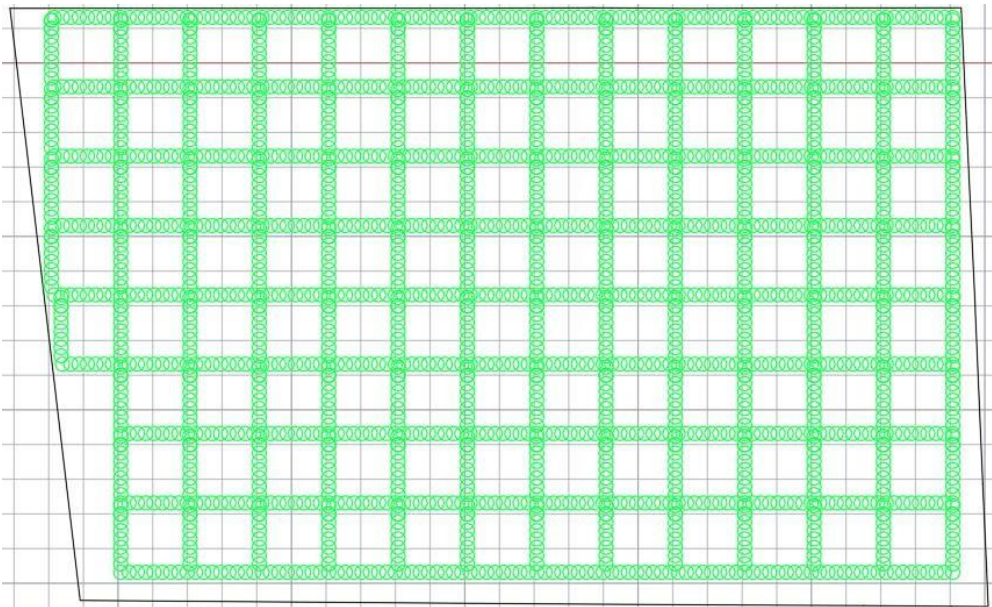
CSR pre SM	CSR post SM	CRR7.5	CRR	FS
0,49	0,49	0,22	0,19	0,38
0,49	0,49	0,35	0,26	0,54
0,49	0,49	0,36	0,27	0,54
0,49	0,49	0,32	0,25	0,50
0,49	0,49	0,38	0,28	0,56
0,49	0,49	0,29	0,23	0,46
0,50	0,50	0,27	0,21	0,43
0,50	0,50	0,25	0,20	0,40
0,50	0,50	0,24	0,20	0,40
0,50	0,50	0,25	0,20	0,40
0,50	0,11	0,27	0,21	1,90
0,50	0,11	0,28	0,22	1,94
0,51	0,11	0,28	0,22	1,89
0,51	0,11	0,29	0,22	1,97
0,51	0,11	0,30	0,23	2,00
0,51	0,12	0,31	0,24	2,00
0,51	0,12	0,34	0,25	2,00
0,51	0,12	0,39	0,28	2,00
0,51	0,12	0,45	0,31	2,00
0,51	0,12	0,48	0,33	2,00
0,52	0,12	0,54	0,36	2,00

### C. Otras opciones de diseño, método Deep Soil Mixing.

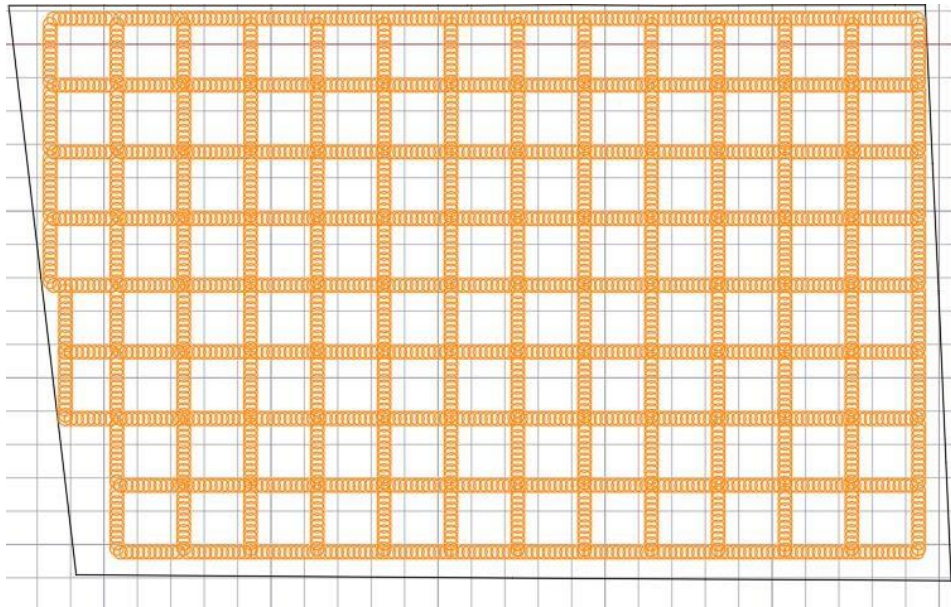
Diseño B:



Diseño C:



Diseño D:



## D. Informe Mecánica de Suelos – 5 oriente

Ubicación y profundidad CPT:

CPT	Profundidad máxima (m)	UTM	Coordenada UTM	
			Norte	Este
CPTu01	27.40	19H	6343321	262295
CPTu02	26.40	19H	6343268	262316



Mediciones en terreno CTP:

