



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS DE SISTEMAS DE MICROPILOTES PARA SU USO EN SUELOS LICUABLES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

SERGIO ANDRÉS MENESES SILVA

PROFESOR GUÍA:

SEBASTIAN BOLDRINI LÓPEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ROBERTO GESCHE SCHULER

FELIPE OCHOA CORNEJO

SANTIAGO DE CHILE

2019

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL**

POR: SERGIO MENESES S.

FECHA: 21/10/2019

PROFESOR GUÍA: SEBASTIAN BOLDRINI L.

**ANÁLISIS DE SISTEMAS DE MICROPILOTES PARA SU USO EN
SUELOS LICUABLES**

Los micropilotes se definen como pilotes de diámetro pequeño (menos de 300 mm) que trabajan tanto a tracción como a compresión. Corresponden a un sistema de fundación versátil y de alta velocidad de ejecución. No obstante, existen ámbitos en los que se desconoce la efectividad de esta solución debido a la falta de experiencia y poca documentación, tal como ocurre en el caso de suelos licuables.

El presente estudio corresponde a la evaluación de distintas configuraciones de micropilotes con la finalidad de observar las respuestas que presentan en suelos que posean estratos licuables. Para ello, se utilizan cuatro composiciones de estos elementos en modelos que poseen distinta profundidad del suelo licuable.

Para lograr este análisis, se utiliza el programa PLAXIS 3D, donde se genera una simulación dinámica que implementa el modelo constitutivo UBC3D-PLM, el cual sirve para modelar suelos licuables. Los parámetros que se utilizan para calibrar dicho modelo corresponden a correlaciones de ensayos SPT de los que se disponen.

El objetivo de esta investigación es reducir la incertidumbre que se tiene en la efectividad de la solución de micropilotes para un puente peatonal en estas condiciones, y cargas semejantes a las señaladas en este trabajo, por medio de modelos realizados en el software mencionado anteriormente. Además, se entregan recomendaciones del diseño de micropilotes a partir de los resultados obtenidos.

Finalmente, se incorpora una solución utilizando pilotes tradicionales con el fin de demostrar, por medio de métodos conocidos, la eficacia de los micropilotes. Además, se realiza un estudio económico para ambas alternativas.

A mis padres, gracias por todo...

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, agradezco a mis padres Sergio y Verónica por su apoyo incondicional. Gracias por entregarnos las herramientas necesarias para poder ser las personas que somos. Gracias por su preocupación, por su amor, por su comprensión, su cariño, por el esfuerzo que realizaron y realizan cada día para poder facilitarnos la vida a mi hermano y a mí, espero me alcance la vida para poder retribuirles todo lo que me han dado. También agradezco a mi hermano Pablo por su paciencia y compañía, y por aguantarme las veces que lo molesto, eres una de las personas más importantes en mi vida. A mi perrita Ñati por acompañarme y entretenerme en esta época de mi vida. A mi tía Alejandra y tío Mario por siempre poder sacarme una sonrisa. A mis primos, especialmente a mi hijo Nicolás, por las risas y los buenos momentos. Por último, a mi abuelita Giorgina, sé que estaría orgullosa de mí y de este logro, siempre la recordaré.

Agradezco a los Feeders por las risas, apoyo, consejos, noches de juegos y diversión, helados y pasteles de la infancia, gracias Mati por formar este grupo, gracias Terry, Bachi, Javier y David por todo, fueron muy importantes para sobrellevar el estrés de la facultad y sé que puedo contar con ustedes en cualquier momento.

Agradezco al Team Ñoñef, por los buenos momentos y apoyo en esta etapa, tuve el privilegio de conocer a grandes personas y amigos. En especial, gracias Camilo por tu paciencia, por el apañe a todo, por los días de estudios, por ser mi compañero en los trabajos y tareas, sé que puedo contar contigo para lo que sea. Al igual que Lisper, a pesar de no estar juntos en la misma carrera seguíamos compartiendo, gracias por las tardes de relajo y los buenos momentos. También le agradezco a Cami, Vale y Nicole, por los días de pasta y risas, son personas muy bacanes, gracias por ser mis amigas.

A mis compañeros de carrera, Tomás, Danko, Cáceres, Parada, Miti, Egger y Boada. A pesar de ser tan ebrios siempre tenían la disposición de ayudarme cuando lo necesite. Disfrute mucho estudiar con ustedes, las risas no faltaron. Al Migue, gracias por tu ayuda en geotecnia y tu disposición de explicarme las veces que no entendía.

Agradezco a SUBT SpA por la oportunidad de realizar mi memoria con ustedes. Gracias a Sebastián por confiar en mí y en mis capacidades. También le agradezco a Carlos por la gran disposición que tuvo conmigo durante mi estadía en la empresa, gracias por todo.

Finalmente, le agradezco a mi chinita Claudia. Gracias por acompañarme y soportarme en esta etapa y hacerla más llevadera.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. MOTIVACIÓN	2
1.2. OBJETIVO GENERAL	3
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4. METODOLOGÍA	4
1.5. RESULTADOS ESPERADOS	5
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. LICUEFACCIÓN	6
2.2. MODELO CONSTITUTIVO	12
2.2.1. HARDENING SOIL	13
2.2.2. UBC3D-PLM	16
2.3. MICROPILOTES	20
3. REVISIÓN DE PROYECTOS	26
3.1. PASARELA PLAYA BLANCA SUR	26
3.2. PASARELA PARQUE EL CORONEL	27
3.3. PASARELA PROYECTO IBAHT DE MOLY-COP	27
3.4. HOSPITAL CHILE CHICO	27
4. DISEÑO DE MICROPILOTES	33
4.1. CAPACIDAD CARGA INTERNA	39
4.2. CAPACIDAD CARGA EXTERNA	40
4.2.1. FALLA DE ADHERENCIA DE BULBO	41
4.2.2. FALLA POR ARRANCAMIENTO DEL SUELO	42
4.2.3. FALLA POR PANDEO DEL ELEMENTO	43
4.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD EQUIVALENTE PARA MICROPILOTES	44
5. DEFINICIÓN DE MODELOS	46
6. RESULTADOS	49
7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	76
8. CONCLUSIONES	84
9. BIBLIOGRAFÍA	87
ANEXO A : ANÁLISIS DE LICUEFACCIÓN	91
ANEXO B: DISEÑO DE MICROPILOTES	93
B.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE ANÁLISIS	93
B.2. CAPACIDAD DE CARGA INTERNA	97
B.3. CAPACIDAD DE CARGA EXTERNA	98
ANEXO C: ESFUERZOS EN LOS MICROPILOTES POR PLAXIS 3D	107
ANEXO D: DISEÑO DE PILOTE	114

INDICE DE TABLAS

TABLA 1: CORRECCIONES SPT POR ROBERTSON & WRIDE (1998), MODIFICADO DE SKEMPTON (1986)	8
TABLA 2: PARÁMETROS MODELO HARDENING SOIL HS SMALL	16
TABLA 3: PARÁMETROS MODELO UBC3D-PLM.....	18
TABLA 4: NSPT PROMEDIO POR ESTRATO	28
TABLA 5: VALORES PARA CALIBRAR MODELO CONSTITUTIVO UBC3D-PLM.....	29
TABLA 6: VALORES PARA CALIBRAR MODELO CONSTITUTIVO HARDENING SOIL, CONDICIÓN INICIAL DE ESTRATO LICUABLE	29
TABLA 7: VALORES PARA CALIBRAR MODELO HARDENING SOIL, ESTRATO NO LICUABLE [FUENTE: BRINKGREVE, KUMARSWAMY, S., & SWOLFS, W. M. (2006),]	30
TABLA 8: COMBINACIONES DE CARGAS DE DISEÑO PARA FUNDACIÓN TIPO [FUENTE: MEMORIA DE CÁLCULO PROYECTO PASARELA PARQUE CORONEL (2012)].....	31
TABLA 9: TIPOS DE CONFIGURACIONES DE MICROPILOTES A UTILIZAR	33
TABLA 10: POSICIÓN DE LOS MICROPILOTES PARA UNA CONFIGURACIÓN DE 12 ELEMENTOS	33
TABLA 11: POSICIÓN DE MICROPILOTES PARA UNA CONFIGURACIÓN DE 16 ELEMENTOS	34
TABLA 12: GIROS Y DESPLAZAMIENTOS FINALES CONFIGURACIÓN A	36
TABLA 13: SOLICITACIÓN MICROPILOTES CONFIGURACIÓN A.....	37
TABLA 14: GIROS Y DESPLAZAMIENTOS FINALES CONFIGURACIÓN B	37
TABLA 15: SOLICITACIÓN MICROPILOTES CONFIGURACIÓN B.....	37
TABLA 16: GIROS Y DESPLAZAMIENTOS FINALES CONFIGURACIÓN C	38
TABLA 17: SOLICITACIÓN MICROPILOTES CONFIGURACIÓN C.....	38
TABLA 18: GIROS Y DESPLAZAMIENTOS FINALES CONFIGURACIÓN D	38
TABLA 19: SOLICITACIÓN MICROPILOTES CONFIGURACIÓN D	39
TABLA 20: CARGA ADMISIBLE DE MICROPILOTES SEGÚN CAPACIDAD DE CARGA INTERNA	40
TABLA 21: DIÁMETRO DE PERFORACIÓN DE MICROPILOTES	42
TABLA 22: PARÁMETROS PARA DETERMINAR EL MÓDULO DE YOUNG EQUIVALENTE	45
TABLA 23: COMPARACIÓN DE ASENTAMIENTOS MEDIANTE EL MÉTODO DE ISHIHARA (1992) Y PLAXIS 3D	62
TABLA 24: SOLICITACIONES MÁXIMAS Y MÍNIMAS RESPECTO A UNA PROFUNDIDAD DE ESTRATO LICUABLE DE 3 METROS, PARA CADA CONFIGURACIÓN DE MICROPILOTES	64
TABLA 25: SOLICITACIONES MÁXIMAS Y MÍNIMAS RESPECTO A UNA PROFUNDIDAD DE ESTRATO LICUABLE DE 5 METROS, PARA CADA CONFIGURACIÓN DE MICROPILOTES	65
TABLA 26: SOLICITACIONES MÁXIMAS Y MÍNIMAS RESPECTO A UNA PROFUNDIDAD DE ESTRATO LICUABLE DE 8 METROS, PARA CADA CONFIGURACIÓN DE MICROPILOTES	65
TABLA 27: EVALUACIÓN DE PANDEO MEDIANTE LO PROPUESTO POR DAVISSON Y ROBINSON (1965), CONFIGURACIÓN D	66
TABLA 28: EVALUACIÓN DE PANDEO MEDIANTE LO PROPUESTO POR DAVISSON Y ROBINSON (1965), CONFIGURACIÓN C.....	67
TABLA 29: EVALUACIÓN DE PANDEO MEDIANTE LO PROPUESTO POR DAVISSON Y ROBINSON (1965), CONFIGURACIÓN B.....	67
TABLA 30: EVALUACIÓN DE PANDEO MEDIANTE LO PROPUESTO POR DAVISSON Y ROBINSON (1965), CONFIGURACIÓN A.....	68
TABLA 32: EVALUACIÓN ECONÓMICA OPCIÓN MICROPILOTES	82

TABLA 33: EVALUACIÓN ECONÓMICA OPCIÓN PILOTE	82
TABLA 34: ANÁLISIS DE LICUEFACCIÓN PASARELA PLAYA BLANCA SUR	91
TABLA 35: ANÁLISIS DE LICUEFACCIÓN PASARELA PARQUE EL CORONEL	91
TABLA 36: ANÁLISIS DE LICUEFACCIÓN HOSPITAL CHILE CHICO	91
TABLA 37: ANÁLISIS DE LICUEFACCIÓN PASARELA MOLY-COP	92
TABLA 38: ANÁLISIS DE LICUEFACCIÓN MODELO CON 3 METROS DE ESTRATO LICUABLE	92
TABLA 39: ANÁLISIS DE LICUEFACCIÓN MODELO CON 5 METROS DE ESTRATO LICUABLE	92
TABLA 40: ANÁLISIS DE LICUEFACCIÓN MODELO CON 8 METROS DE ESTRATO LICUABLE	92
TABLA 41: PROPIEDADES DE MICROPILOTES PERFORANTE TIPO ISCHEBECK	97
TABLA 42: FACTORES DE MAYORACIÓN DE LAS SOLICITACIONES PARA EL ESTADO LÍMITE DE LA FALLA ESTRUCTURAL.....	98
TABLA 43: FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIAS PARA EL ESTADO LÍMITE DE LA FALLA ESTRUCTURAL	98
TABLA 44: CAPACIDAD ADMISIBLE SEGÚN FRICCIÓN PARA CONFIGURACIÓN A, CON 3 METROS DE ESTRATO LICUABLE	99
TABLA 45: CAPACIDAD ADMISIBLE SEGÚN FRICCIÓN PARA CONFIGURACIÓN A, CON 5 METROS DE ESTRATO LICUABLE	99
TABLA 46: CAPACIDAD ADMISIBLE SEGÚN FRICCIÓN PARA CONFIGURACIÓN A, CON 8 METROS DE ESTRATO LICUABLE	100
TABLA 47: CAPACIDAD ADMISIBLE SEGÚN FRICCIÓN PARA CONFIGURACIÓN DE B, CON 3 METROS DE ESTRATO LICUABLE.....	100
TABLA 48: CAPACIDAD ADMISIBLE SEGÚN FRICCIÓN PARA CONFIGURACIÓN B, CON 5 METROS DE ESTRATO LICUABLE	100
TABLA 49: CAPACIDAD ADMISIBLE SEGÚN FRICCIÓN PARA CONFIGURACIÓN B, CON 8 METROS DE ESTRATO LICUABLE	101
TABLA 50: CAPACIDAD ADMISIBLE SEGÚN FRICCIÓN PARA CONFIGURACIÓN C, CON 3 METROS DE ESTRATO LICUABLE	101
TABLA 51: CAPACIDAD ADMISIBLE SEGÚN FRICCIÓN PARA CONFIGURACIÓN C, CON 5 METROS DE ESTRATO LICUABLE	102
TABLA 52: CAPACIDAD ADMISIBLE SEGÚN FRICCIÓN PARA CONFIGURACIÓN C, CON 8 METROS DE ESTRATO LICUABLE	102
TABLA 53: CAPACIDAD ADMISIBLE SEGÚN FRICCIÓN PARA CONFIGURACIÓN D, CON 3 METROS DE ESTRATO LICUABLE	103
TABLA 54: CAPACIDAD ADMISIBLE SEGÚN FRICCIÓN PARA CONFIGURACIÓN D, CON 5 METROS DE ESTRATO LICUABLE	103
TABLA 55: CAPACIDAD ADMISIBLE SEGÚN FRICCIÓN PARA CONFIGURACIÓN D, CON 8 METROS DE ESTRATO LICUABLE	104
TABLA 56: CAPACIDAD ADMISIBLE POR ARRANCAMIENTO PARA CASO MÍNIMO EN CONFIGURACIÓN A	104
TABLA 57: CAPACIDAD ADMISIBLE POR ARRANCAMIENTO PARA CASO MÍNIMO EN CONFIGURACIÓN B	105
TABLA 58: CAPACIDAD ADMISIBLE POR ARRANCAMIENTO PARA CASO MÍNIMO EN CONFIGURACIÓN C	105
TABLA 59: CAPACIDAD ADMISIBLE POR ARRANCAMIENTO PARA CASO MÍNIMO EN CONFIGURACIÓN D	106
TABLA 60: SOLICITACIONES EN LOS MICROPILOTES PARA LA CONFIGURACIÓN D DADAS POR PLAXIS 3D. PROFUNDIDAD DE ESTRATO LICUABLE DE 3 METROS	107

TABLA 61: SOLICITACIONES EN LOS MICROPILOTES PARA LA CONFIGURACIÓN D DADAS POR PLAXIS 3D. PROFUNDIDAD DE ESTRATO LICUABLE DE 5 METROS	108
TABLA 62: SOLICITACIONES EN LOS MICROPILOTES PARA LA CONFIGURACIÓN D DADAS POR PLAXIS 3D. PROFUNDIDAD DE ESTRATO LICUABLE DE 8 METROS	108
TABLA 63: SOLICITACIONES EN LOS MICROPILOTES PARA LA CONFIGURACIÓN C DADAS POR PLAXIS 3D. PROFUNDIDAD DE ESTRATO LICUABLE DE 3 METROS	109
TABLA 64: SOLICITACIONES EN LOS MICROPILOTES PARA LA CONFIGURACIÓN C DADAS POR PLAXIS 3D. PROFUNDIDAD DE ESTRATO LICUABLE DE 5 METROS	109
TABLA 65: SOLICITACIONES EN LOS MICROPILOTES PARA LA CONFIGURACIÓN C DADAS POR PLAXIS 3D. PROFUNDIDAD DE ESTRATO LICUABLE DE 8 METROS	110
TABLA 66: SOLICITACIONES EN LOS MICROPILOTES PARA LA CONFIGURACIÓN B DADAS POR PLAXIS 3D. PROFUNDIDAD DE ESTRATO LICUABLE DE 3 METROS	110
TABLA 67: SOLICITACIONES EN LOS MICROPILOTES PARA LA CONFIGURACIÓN B DADAS POR PLAXIS 3D. PROFUNDIDAD DE ESTRATO LICUABLE DE 5 METROS	111
TABLA 68: SOLICITACIONES EN LOS MICROPILOTES PARA LA CONFIGURACIÓN B DADAS POR PLAXIS 3D. PROFUNDIDAD DE ESTRATO LICUABLE DE 8 METROS	111
TABLA 69: SOLICITACIONES EN LOS MICROPILOTES PARA LA CONFIGURACIÓN A DADAS POR PLAXIS 3D. PROFUNDIDAD DE ESTRATO LICUABLE DE 3 METROS	112
TABLA 70: SOLICITACIONES EN LOS MICROPILOTES PARA LA CONFIGURACIÓN A DADAS POR PLAXIS 3D. PROFUNDIDAD DE ESTRATO LICUABLE DE 5 METROS	112
TABLA 71: SOLICITACIONES EN LOS MICROPILOTES PARA LA CONFIGURACIÓN A DADAS POR PLAXIS 3D. PROFUNDIDAD DE ESTRATO LICUABLE DE 8 METROS	113
TABLA 72: CARGAS DE DISEÑO PARA PILOTE	114
TABLA 73: FACTORES DE CONVERSIÓN PARA ENSAYOS DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (FUENTE: DIN 4014)	115
TABLA 74: TABLA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD POR PUNTA DE LOS PILOTES EN SUELOS GRANULARES (FUENTE: EA PHÄHLE 2013)	115
TABLA 75: TABLA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD POR FUSTE DE LOS PILOTES EN SUELOS GRANULARES (FUENTE: EA PHÄHLE 2013)	115
TABLA 76: SUB MÓDULO DE REACCIÓN PARA SUELOS GRANULARES [FUENTE: DIN 4014]	117

INDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURA 1: COMPARACIÓN DE LA LOGÍSTICA NECESARIA PARA MICROPILOTES Y PILOTES	3
FIGURA 2: MAGNITUDE SCALING FACTOR, MSF, VALORES PROPUESTOS POR DIVERSOS INVESTIGADORES. IDRISSE 1999.....	9
FIGURA 3: ILUSTRACIÓN DE LA RESPUESTA DEL SUELO Y DE INTERACCIÓN PILA-SUELO EN SUELOS LICUABLES: (A) EXCESO DE PRESIÓN DE POROS; (B) DESPLAZAMIENTO LATERAL DEL SUELO; (C) CARGAS EN LA PILA DURANTE CARGAS SÍSMICAS (CYCLIC PHASE), Y (D) DESPLAZAMIENTO POST-LICUEFACCIÓN. CUBRINOVSKI 2010	11
FIGURA 4: GRÁFICO PARA DETERMINAR LA DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA EN FUNCIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD. ISHIHARA, K., & YOSHIMINE, M. 1992	12
FIGURA 5: RELACIÓN HIPERBÓLICA ESFUERZO-DEFORMACIÓN PARA ENSAYOS TRIAXIALES. FOWLER, A. C. 1997.....	13
FIGURA 6: COMPORTAMIENTO CARACTERÍSTICO DE RIGIDEZ-DEFORMACIÓN DEL SUELO CON RANGOS DE DEFORMACIÓN TÍPICOS DE ENSAYO DE LABORATORIO Y ESTRUCTURAS. ATKINSON & SALLFORS 1991.....	14
FIGURA 7: COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO CLÁSICO DEL SUELO. LAERA, A., & BRINGREVE, R. B. J. 2015	15
FIGURA 8: LEY DE ENDURECIMIENTO HIPERBÓLICA. BEATY & BYRNE 2011	17
FIGURA 9: SOBRE AMORTIGUAMIENTO GENERADO POR EL MODELO UBC3D-PLM DURANTE LAS DESCARGAS. PETALAS ET AL 2012	18
FIGURA 10: GRÁFICO PARA EVALUAR EL PANDEO DE MICROPILOTES. EN EL EJE X SE INGRESA LAS PROPIEDADES DEL ELEMENTO EN IN ² /KIP; Y EN EL EJE Y EL MODULO DE BALASTO DEL SUELO LICUADO (KSI). CADDEN 2002.....	22
FIGURA 11: MODELO EQUIVALENTE PROPUESTO POR DAVISSON Y ROBINSON (1965)	23
FIGURA 12: ESQUEMATIZACIÓN DE UNA PILA "EMBEDDED BEAM" EN PLAXIS 3D. A LA IZQUIERDA SE MUESTRA EL ELEMENTO EN CUALQUIER UBICACIÓN Y POSICIÓN ARBITRARIA, Y A LA DERECHA LAS ZONAS QUE COMPONEN EL ELEMENTO. DAO, T. P. T. 2011	24
FIGURA 13: INPUT DE ACELERACIÓN BASAL A UNA PROFUNDIDAD DE 50 METROS (EN BASE DEL MODELO EN PLAXIS 3D)	32
FIGURA 14: VISTA EN ELEVACIÓN PARA CONFIGURACIÓN DE MICROPILOTES A Y B. SE OBSERVAN MICROPILOTES VERTICALES Y DOS DIAGONALES EN LA DIRECCIÓN DEL EJE X, LOS CUALES SE REPLICAN EN PROFUNDIDAD. ADEMÁS, EN LA FIGURA, EXISTEN DOS MICROPILOTES QUE SE ENCUENTRAN EN DIRECCIÓN DEL EJE Y (SALEN DEL PLANO). ESCALA 1:400.....	34
FIGURA 15: VISTA EN ELEVACIÓN PARA CONFIGURACIÓN DE MICROPILOTES C Y D. SE OBSERVAN MICROPILOTES VERTICALES Y DOS DIAGONALES EN LA DIRECCIÓN DEL EJE X, LOS CUALES SE REPLICAN EN PROFUNDIDAD. ADEMÁS, EN LA FIGURA, EXISTEN TRES MICROPILOTES QUE SE ENCUENTRAN EN DIRECCIÓN DEL EJE Y (SALEN DEL PLANO). ESCALA 1:400.....	35
FIGURA 16: CORTE A-A: VISTA EN PLANTA DADO DE FUNDACIÓN PARA CONFIGURACIÓN DE MICROPILOTES A Y B. CÍRCULO NARANJO INDICA APLICACIÓN DE CARGAS, EL RESTO DE LOS CÍRCULOS INDICAN LOS MICROPILOTES Y LAS FLECHAS SU DIRECCIÓN DE INCLINACIÓN. IMAGEN REFERENCIAL.	35

FIGURA 17: CORTE B-B: VISTA EN PLANTA DADO DE FUNDACIÓN PARA CONFIGURACIÓN DE MICROPILOTES C Y D. CÍRCULO NARANJO INDICA APLICACIÓN DE CARGAS, EL RESTO DE LOS CÍRCULOS INDICAN LOS MICROPILOTES Y LAS FLECHAS SU DIRECCIÓN DE INCLINACIÓN. IMAGEN REFERENCIAL.	36
FIGURA 18: CORRELACIÓN PROPUESTA POR BUSTAMANTE PARA LA FRICCIÓN UNITARIA EN ARENAS Y GRAVAS. BUSTAMANTE 1985	41
FIGURA 19: EVALUACIÓN DE CAPACIDAD DE PANDEO. CADDEN 2002.....	44
FIGURA 20: MODELO CON ESTRATO DE 3 METROS LICUABLES. UNIDADES EN METRO. ESCALA 1:800.....	47
FIGURA 21: MODELO CON ESTRATO DE 5 METROS LICUABLE. UNIDADES EN METRO. ESCALA 1:800.....	48
FIGURA 22: MODELO CON ESTRATO DE 8 METROS LICUABLES. UNIDADES EN METRO. ESCALA 1:800.....	48
FIGURA 23: RESPUESTA SUPERFICIAL DE ACELERACIONES HORIZONTALES PARA CONFIGURACIÓN CON ESTRATO LICUABLE DE 3 METROS.....	49
FIGURA 24: RESPUESTA SUPERFICIAL DE ACELERACIONES HORIZONTALES PARA CONFIGURACIÓN CON ESTRATO LICUABLE DE 5 METROS.....	50
FIGURA 25: RESPUESTA SUPERFICIAL DE ACELERACIONES HORIZONTALES PARA CONFIGURACIÓN CON ESTRATO LICUABLE DE 8 METROS.....	50
FIGURA 26: RESPUESTA DE ACELERACIONES HORIZONTALES EN SUPERFICIE PARA ESTRATO DE 3 METROS LICUABLES CON 12 MICROPILOTES	51
FIGURA 27: RESPUESTA DE ACELERACIONES HORIZONTALES EN SUPERFICIE PARA ESTRATO DE 3 METROS LICUABLES CON 16 MICROPILOTES	52
FIGURA 28: RESPUESTA DE ACELERACIONES HORIZONTALES EN SUPERFICIE PARA ESTRATO DE 5 METROS LICUABLES CON 12 MICROPILOTES	52
FIGURA 29: RESPUESTA DE ACELERACIONES HORIZONTALES EN SUPERFICIE PARA ESTRATO DE 5 METROS LICUABLES CON 16 MICROPILOTES	53
FIGURA 30: RESPUESTA DE ACELERACIONES HORIZONTALES EN SUPERFICIE PARA ESTRATO DE 8 METROS LICUABLES CON 12 MICROPILOTES	53
FIGURA 31: RESPUESTA DE ACELERACIONES HORIZONTALES EN SUPERFICIE PARA ESTRATO DE 8 METROS LICUABLES CON 16 MICROPILOTES	54
FIGURA 32: ÍNDICE DE EXCESO DE PRESIÓN DE POROS PARA ESTRATO LICUABLE DE 3 METROS, CON SISTEMA DE MICROPILOTES INCORPORADO. IMAGEN REPRESENTATIVA ...	55
FIGURA 33: ÍNDICE DE EXCESO DE PRESIÓN DE POROS PARA ESTRATO LICUABLE DE 5 METROS, CON SISTEMA DE MICROPILOTES INCORPORADO. IMAGEN REPRESENTATIVA ...	55
FIGURA 34: ÍNDICE DE EXCESO DE PRESIÓN DE POROS PARA ESTRATO LICUABLE DE 8 METROS, CON SISTEMA DE MICROPILOTES INCORPORADO. IMAGEN REPRESENTATIVA ...	56
FIGURA 35: EXCESO DE PRESIONES DE POROS VS TIEMPO PARA ESTRATO LICUABLE DE 3 METROS, EN UN RADIO DE 5 METROS DEL CENTRO DEL DADO DE FUNDACIÓN DE LA ESTRUCTURA, EN LA DIRECCIÓN DE APLICACIÓN DEL SISMO.	57
FIGURA 36: EXCESO DE PRESIONES DE POROS VS TIEMPO PARA ESTRATO LICUABLE DE 5 METROS, EN UN RADIO DE 5 METROS DEL CENTRO DEL DADO DE FUNDACIÓN DE LA ESTRUCTURA, EN LA DIRECCIÓN DE APLICACIÓN DEL SISMO.	57
FIGURA 37: EXCESO DE PRESIONES DE POROS VS TIEMPO PARA ESTRATO LICUABLE DE 8 METROS, EN UN RADIO DE 5 METROS DEL CENTRO DEL DADO DE FUNDACIÓN DE LA ESTRUCTURA, EN LA DIRECCIÓN DE APLICACIÓN DEL SISMO.	58
FIGURA 38: DESPLAZAMIENTO LATERAL PARA ESTRATO LICUABLE DE 3 METROS.....	59

FIGURA 39: DESPLAZAMIENTO LATERAL PARA ESTRATO LICUABLE DE 5 METROS.....	59
FIGURA 40: DESPLAZAMIENTO LATERAL PARA ESTRATO LICUABLE DE 8 METROS.....	60
FIGURA 41: ASENTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA PARA DISTINTAS CONFIGURACIONES PARA UN ESTRATO LICUABLE DE 3 METROS	61
FIGURA 42: ASENTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA PARA DISTINTAS CONFIGURACIONES PARA UN ESTRATO LICUABLE DE 5 METROS	61
FIGURA 43: ASENTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA PARA DISTINTAS CONFIGURACIONES PARA UN ESTRATO LICUABLE DE 8 METROS	62
FIGURA 44: VISTA EN ELEVACIÓN PARA AMBOS EJES, ASENTAMIENTOS PARA UN ESTRATO DE 3 METROS LICUABLES. IMAGEN REPRESENTATIVA	63
FIGURA 45: VISTA EN ELEVACIÓN PARA AMBOS EJES, ASENTAMIENTOS PARA UN ESTRATO DE 5 METROS LICUABLES. IMAGEN REPRESENTATIVA	63
FIGURA 46: VISTA EN ELEVACIÓN PARA AMBOS EJES, ASENTAMIENTOS PARA UN ESTRATO DE 8 METROS LICUABLES. IMAGEN REPRESENTATIVA	64
FIGURA 47: ESPECTRO DE PSEUDO ACELERACIONES PARA LOS 3 CASOS DE ESTRATO LICUABLE, SIN ESTRUCTURA NI SISTEMA DE REFORZAMIENTO	70
FIGURA 48: ESPECTRO DE PSEUDO ACELERACIONES PARA LOS 3 CASOS DE ESTRATO LICUABLE CON ESTRUCTURA.....	70
FIGURA 49: ESFUERZO DE CORTE RELATIVO ALREDEDOR DE LA ESTRUCTURA, A LOS 75 SEGUNDOS, PARA UN ESTRATO LICUABLE DE 3 METROS (VISTA EN PLANTA). ESCALA 1:1000	71
FIGURA 50: ESFUERZO DE CORTE RELATIVO ALREDEDOR DE LA ESTRUCTURA, A LOS 75 SEGUNDOS, PARA UN ESTRATO LICUABLE DE 5 METROS (VISTA EN PLANTA). ESCALA 1:1000	72
FIGURA 51: ESFUERZO DE CORTE RELATIVO ALREDEDOR DE LA ESTRUCTURA, A LOS 75 SEGUNDOS, PARA UN ESTRATO LICUABLE DE 8 METROS (VISTA EN PLANTA). ESCALA 1:1000	72
FIGURA 52: ASENTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA PARA UN ESTRATO LICUABLE DE 3 METROS, PILOTE Y MICROPILOTES	74
FIGURA 53: EXCESO DE PRESIONES DE POROS VS TIEMPO PARA ESTRATO LICUABLE DE 3 METROS, PILOTE Y MICROPILOTES, EN UN RADIO DE 5 METROS DEL CENTRO DEL DADO DE FUNDACIÓN DE LA ESTRUCTURA, EN LA DIRECCIÓN DE APLICACIÓN DEL SISMO.	74
FIGURA 54: ESFUERZO DE CORTE RELATIVO A LOS 75 SEGUNDOS PARA ESTRATO LICUABLE DE 3 METROS UTILIZANDO PILOTE (VISTA EN PLANTA). ESCALA 1:1000	75
FIGURA 55: ESFUERZOS EXISTENTES BAJO UNA ESTRUCTURA ANTES DE LA OCURRENCIA DE UN SISMO. YOSHIMI & OH-OKA, 1975	77
FIGURA 56: ASENTAMIENTOS TOLERABLES PARA LA FUNDACIÓN DE UNA PASARELA CONSIDERANDO UNA CONFIGURACIÓN D DE MICROPILOTES. BOZOUK, M. 1978	79
FIGURA 57: DEFINICIÓN GRADOS DE LIBERTAD	93
FIGURA 58: TRASLADO DE LAS CARGAS AL CENTRO DE GRAVEDAD DE LA FUNDACIÓN	94
FIGURA 59: VINCULACIÓN ESTRUCTURAL PARA EL ANÁLISIS DE LOS MICROPILOTES	94
FIGURA 60: VALOR DE LA FRICCIÓN UNITARIA A PARTIR DE LA CORRELACIÓN PROPUESTA POR BUSTAMANTE 1985	98
FIGURA 61: CURVA CARGA DEFORMACIÓN EN CABEZAL PARA PILOTE DE 15 M DE LONGITUD	116
FIGURA 62: DIAGRAMA DE DESPLAZAMIENTO DEL MODELO DE PILOTE	118
FIGURA 63: RESULTANTE DE MOMENTO Y CARGA AXIAL ANTE CARGA LATERAL. SAP2000.	118

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo de título se analizará el uso de fundaciones con sistemas de micropilotes en suelos susceptibles de sufrir licuación durante un sismo severo, en donde se estudiarán los efectos que generan estos elementos en su entorno y en el comportamiento que muestra el sistema estructural ante las sollicitaciones sísmicas.

Respecto a los micropilotes, estos se definen como pilotes de pequeño diámetro (menos de 300 mm) resistente a la tracción y compresión que pueden ser utilizados como un sistema de fundación o de reforzamiento para fundaciones que necesiten aumentar su capacidad de soporte. Están compuestos por un elemento de acero, instalado mediante una perforación de pequeño diámetro en terreno, recubierto y protegido por lechada de cemento.

Entre las ventajas de este método destaca la mínima perturbación que produce su instalación en las estructuras adyacentes, al suelo y al medio ambiente. Además, el equipo que se utiliza permite instalar estos elementos en cualquier ángulo por debajo de la horizontal (Armour, T., Groneck, P., Keeley, J., & Sharma, S. (2000)).

En un principio, estos elementos solo fueron utilizados como sistema de reforzamiento. No obstante, debido al desarrollo de la técnica en el tiempo, esta solución comenzó a desarrollarse hasta llegar a ser lo que es hoy en día; un sistema de fundación versátil y de alta velocidad de ejecución. Aun así, existe escasa documentación de la efectividad de los micropilotes en suelos licuables.

Para grandes estructuras, existen métodos comprobados y efectivos para mitigar la licuefacción por medio de pilotes, columnas de grava, reemplazos o mejoramientos de suelos. En cambio, para estructuras livianas esto resulta costoso y poco eficaz.

Esto último se ve reflejado al querer fundar obras menores como caminos de accesos o puentes peatonales, por lo que a partir de esta investigación se busca presentar una alternativa adecuada y factible para generar los cimientos de estas estructuras.

Con el fin de estudiar el comportamiento del sistema, se considera una estructura tipo puente peatonal, la cual es fundada en un suelo que muestra capas licuables. Para ello, se generará un modelo en PLAXIS 3D (basado en elementos finitos) utilizando los modelos constitutivos correspondientes para representar de manera adecuada la licuefacción. Los parámetros que son ingresados a dicho modelo se obtienen a partir de la revisión de proyectos ejecutados y no ejecutados con esta alternativa.

Este trabajo se divide en 8 capítulos. El primero de ellos corresponde a una introducción al tema, donde se indican los objetivos y motivaciones que llevaron a desarrollar este trabajo.

El segundo capítulo corresponde al marco teórico que es necesario para entender el desarrollo de esta investigación

En el tercer capítulo se detalla la revisión que se realiza a cada proyecto disponible. Además, en ese capítulo se definen los parámetros necesarios para calibrar los modelos constitutivos a utilizar en este informe.

En el cuarto capítulo se muestra el diseño de micropilotes a partir de las capacidades admisibles del elemento y de los posibles mecanismos de falla.

En el quinto capítulo se entregan detalles acerca de los modelos que se definen en el programa PLAXIS 3D, explicando las dimensiones, condiciones de borde y elementos utilizados.

El sexto capítulo corresponde a los resultados asociados a las distintas configuraciones de micropilotes para distintas profundidades de estratos licuables.

En el séptimo y octavo capítulo, se presentan las discusiones y conclusiones asociadas al trabajo que ha sido desarrollado.

1.1. Motivación

Actualmente en Chile, existen edificios y puentes peatonales que han sido fundadas con micropilotes, en donde se ha demostrado que es un sistema de fundación que es capaz de soportar cargas sísmicas evitando que la estructura colapse o se generen grandes daños en ella.

Sin embargo, en vista de la diversidad de suelos presentes en el país, existen casos en donde se desconoce la efectividad de los micropilotes, por lo que es preferible utilizar métodos conocidos y comprobados.

Al ser una metodología que se encuentra en desarrollo, existe una gran cantidad de investigaciones por realizar. Una de ellas es respecto a la efectividad de esta solución en suelos con estratos licuables.

Si bien, existen ensayos e investigaciones en donde se ha demostrado que reduce el potencial de licuefacción de un suelo, existe cierto escepticismo a esta técnica debido al desconocimiento de la efectividad de este método en Chile.

Además, el micropilote al ser un elemento esbelto es susceptible a pandear cuando el estrato licuable pierde sus propiedades y se comporta como un líquido.

Lo mencionado anteriormente genera un problema al momento de diseñar dichos elementos, ya que debido a la escasa información e investigación

que se tiene disponible, se utilizan grandes factores de seguridad con el fin de controlar la incertidumbre que se tiene al respecto.

Por último, en términos de logística, la ejecución de micropilotes en cualquier tipo de obra ofrece una opción atractiva respecto a otras alternativas, como es la de pilotes.

En la Figura 1 se muestra un esquema en donde se compara la cantidad de equipos y mano de obra que es necesaria para realizar las instalaciones con ambos métodos.

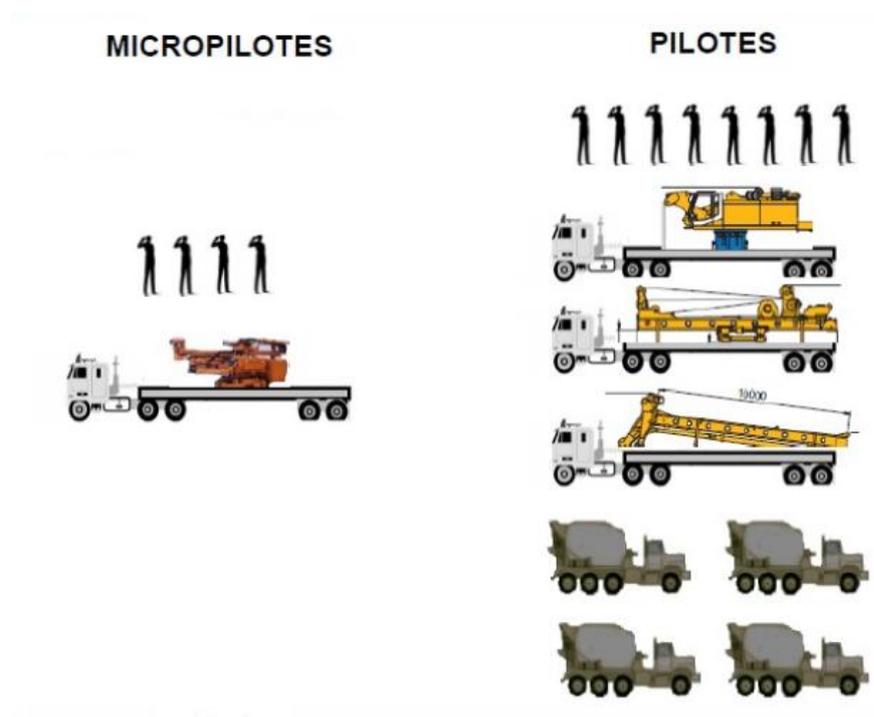


Figura 1: Comparación de la logística necesaria para micropilotes y pilotes

1.2. Objetivo General

Realizar un análisis de fundaciones tipo zapatas de hormigón armado reforzadas con sistemas de micropilotes para su uso en suelos con capas licuables, a partir de la revisión de proyectos ejecutados y no ejecutados.

1.3. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos se detallan a continuación:

- Estudiar el fenómeno de licuefacción y su efecto sobre estructuras reforzadas con micropilotes y en estructuras que han sido fundadas con estos elementos.
- Utilizar el software PLAXIS 3D a los distintos casos en estudio, para generar una simulación dinámica que implemente un modelo constitutivo (UBC3D-PLM). capaz de simular numéricamente la licuefacción y sus efectos sobre el suelo y las estructuras.

- Analizar la influencia de los micropilotes sobre estratos licuables y como estos afectan la respuesta sísmica de la estructura.
- Estudiar el efecto que genera la licuefacción sobre estructuras fundadas con micropilotes. En especial, se analizará el efecto sobre los asentamientos de la estructura y la ocurrencia del fenómeno de pandeo sobre los micropilotes.
- Entregar recomendaciones de diseño para futuras investigaciones en donde se tengan casos similares al estudiado.

1.4. Metodología

La metodología por seguir consiste en:

- Revisión bibliográfica.
- Revisión de proyectos ejecutados, no ejecutados y por ejecutar en donde se haya planteado una solución con micropilotes para remediar capas licuables. Definir caso de estudio.
- Definir parámetros de modelos constitutivos que se utilizaran en PLAXIS 3D.
- Calibración de acelerogramas para conocer la respuesta superficial del sismo con el que se trabajará.
- Realizar modelo de la estructura liviana que será soportada por el suelo a partir de lo revisado en los proyectos. Para ello se utiliza el software ETABS con el fin de conseguir el periodo fundamental de la estructura.
- Diseño de micropilotes. A partir de las combinaciones de carga que se obtienen de la revisión de proyectos, se realizará el diseño de estos elementos, en donde se define la disposición y cantidad. También se realiza el diseño para la capacidad interna y externa de los micropilotes.
- Realizar modelos en PLAXIS 3D, mediante los modelos constitutivos UBC3D-PLM y HARDENING SOIL HS SMALL para evaluar el comportamiento del sistema.
- Análisis de resultados. Se verificará los asentamientos en la estructura y los alrededores. Además, se evaluará si los micropilotes sufrieron pandeo y se observará la forma en que estos afectan a los alrededores del suelo.
- Entregar recomendaciones de diseño en base a lo que se obtuvo del modelo.

1.5. Resultados Esperados

Lo que se busca con este trabajo de título es reducir la incertidumbre que se tiene, tanto en el proceso de diseño, como en la efectividad de la solución de micropilotes a través de modelos realizados en PLAXIS 3D, para suelos que presentan capas licuables. Además, se pretende entregar recomendaciones para el uso de este método cuando se presente el caso en estudio.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Licuefacción

Bajo cargas estáticas y cíclicas, los suelos secos no cohesivos tienden a densificar. Ahora bien, si los suelos se encuentran saturados, la tendencia a densificar causa un incremento en las presiones de poro, el cual no puede ser disipado rápidamente provocando una disminución en los esfuerzos efectivos. Cuando esto ocurre, la resistencia de corte alcanza valores nulos o prácticamente nulos, y el suelo comienza a comportarse como un fluido. En este punto se considera el suelo ha licuado.

Ahora bien, se puede establecer si un suelo es potencialmente licuable a través de métodos semi empíricos y/o dinámicos. Los métodos semi empíricos consisten en la evaluación de un factor de seguridad, el que asocia la capacidad del suelo para resistir la licuefacción (CRR) y el esfuerzo de corte cíclico inducido por el terremoto (CSR).

Por otra parte, los métodos dinámicos se basan en análisis de propagación de ondas en términos de esfuerzos totales y efectivos, lo que da la posibilidad de calcular las presiones de poros a cualquier profundidad. Generalmente para este método se utilizan programas que puedan simular condiciones de terreno.

Respecto a los métodos semi empíricos, existen diferentes aproximaciones para evaluar la susceptibilidad a licuar de una arena saturada. Entre estos métodos destaca el procedimiento propuesto por Seed & Idriss (1971) y posteriormente modificado por Idriss & Boulanger (2006). Este consiste en la evaluación de un factor de seguridad, tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \cdot MSF \quad (1)$$

En donde MSF (Magnitude Scaling Factor) representa un factor de magnitud para terremotos cuyas magnitudes difieran de 7.5.

La relación de esfuerzos cíclicos impuestos por un sismo (CSR, por sus cifras en inglés Cyclic Stress Ratio) se define como el esfuerzo cortante máximo generado por el sismo entre el esfuerzo efectivo vertical de una columna de suelo.

$$CSR = 0.65 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_{vo}} \quad (2)$$

Seed & Idriss (1971) entregaron una forma simplificada para calcular el esfuerzo de corte cíclico ocasionado por un sismo:

$$CSR = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \cdot r_d \quad (3)$$

Donde a_{max} es la máxima aceleración horizontal registrada en la superficie del suelo, g es la aceleración de gravedad, σ_{vo} y σ'_{vo} son el esfuerzo inicial total y efectivo respectivamente, y r_d es un factor de reducción que depende de la profundidad considerada. Para estructuras livianas, se recomienda utilizar lo planteado por Liao & Whitman (1986)

$$r_d = 1.0 - 0.00765 \cdot z \quad \text{for } z \leq 9.15 \text{ m} \quad (4a)$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267 \cdot z \quad \text{for } 9.15 \text{ m} \leq z \leq 23 \text{ m} \quad (5b)$$

Donde z es la profundidad respecto a la superficie del suelo, en metros.

El último parámetro para lograr calcular el valor de CSR corresponde a la máxima aceleración horizontal del evento. Para ello, Youd et al (2001) sugiere tres métodos diferentes para estimar el valor de a_{max} , el cual puede ser obtenido a partir de relaciones empíricas, eventos sísmicos anteriormente registrados en la zona y/o aceleraciones registradas en roca y trasladadas a la superficie del suelo. Para el caso de Chile, se utiliza la máxima aceleración de 0.4 [g].

Ahora bien, para determinar la resistencia cíclica de un suelo (CRR, por sus cifras en inglés Cyclic Resistance Ratio), es necesario conocer los parámetros $(N_1)_{60,CS}$ o q_{c1NCS} , los que corresponden a factores corregidos que se obtienen a partir de los ensayos SPT o CPT. En este trabajo se estudia el caso para el SPT, al cual se le deben aplicar distintas correcciones para obtener el parámetro antes mencionado.

Una de estas correcciones es asociada al confinamiento, el cual se aplica al valor del número de golpes normalizado (según las características del ensayo) al 60% de energía, tal y como se muestra en la siguiente fórmula:

$$(N_1)_{60} = C_N \cdot (N)_{60} \quad (5)$$

El valor del factor C_N se calcula como:

$$C_N = \left(\frac{p_a}{\sigma'_{vo}} \right)^m \quad (6)$$

Donde p_a es la presión atmosférica igual a 100 kPa. El exponente m es considerado igual a 0.5 por Liao & Whitman (1986). No obstante, este no es el único método para determinar este factor. Jamiolkowski et al (1985) utiliza un valor de m igual a 0.56. Ishihara propone otro método de obtención de dicho parámetro, al igual que Idriss & Boulanger (2004), entre otros autores.

Para determinar la resistencia a la penetración del suelo $(N)_{60}$, se calcula como la cantidad de golpes NSPT ponderado por diversas correcciones.

$$(N)_{60} = C_E \cdot C_R \cdot C_B \cdot C_S \cdot N_{SPT} \quad (7)$$

Donde N_{SPT} = Número de golpes en terreno, C_E = Factor de ajuste por tipo de martillo, C_R = Corrección debido a longitud de barras, C_B = Corrección por diámetro de perforación, C_S = Factor de corrección debido al tipo de muestreador.

Tabla 1: Correcciones SPT por Robertson & Wride (1998), modificado de Skempton (1986)

Factor	Variable	Término	Corrección
Relación de energía	Donut hammer	C_E	0.5-1.0
Relación de energía	Safety hammer	C_E	0.7-1.2
Relación de energía	Automatic-trip-Donut-type hammer	C_E	0.8-1.3
Diámetro de excavación	65-115 mm	C_B	1.0
Diámetro de excavación	150 mm	C_B	1.05
Diámetro de excavación	200 mm	C_B	1.15
Longitud de barra	<3 m	C_R	0.75
Longitud de barra	3-4 m	C_R	0.8
Longitud de barra	4-6 m	C_R	0.85
Longitud de barra	6-10 m	C_R	0.95
Longitud de barra	10-30 m	C_R	1.0
Método de muestreo	Muestreo estándar	C_S	1.0
Método de muestreo	Muestreo sin encamisado	C_S	1.1-1.3

Existe una corrección que se realiza por el contenido de finos plásticos que posee el suelo, ya que al tener una mayor cantidad de finos implica una reducción en la probabilidad de que un suelo licue. Esta correlación busca adaptar un suelo con un contenido de finos FC, a un equivalente de arena limpia. La siguiente ecuación fue desarrollada por Youd & Idriss (2001) para corregir dicho valor. Este parámetro se denomina $(N_1)_{60,cs}$.

$$(N_1)_{60,cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (8)$$

Donde:

$$\alpha = 0 \text{ for } FC \leq 5\% \quad (9a)$$

$$\alpha = \exp \left[1.76 - \left(\frac{190}{FC^2} \right) \right] \text{ for } 5\% \leq FC \leq 35\% \quad (9b)$$

$$\alpha = 5.0 \text{ for } FC \geq 35\% \quad (9c)$$

$$\beta = 1.0 \text{ for } FC \leq 5\% \quad (10a)$$

$$\beta = \left[0.99 + \left(\frac{FC^{1.5}}{1000} \right) \right] \text{ for } 5\% \leq FC \leq 35\% \quad (10b)$$

$$\beta = 1.2 \text{ for } FC \geq 35\% \quad (10c)$$

Una vez determinado el índice de penetración estándar corregido a partir de lo revisado hasta este momento, es posible evaluar la resistencia cíclica que presenta el suelo. Dicha expresión permite obtener el valor de CRR para un sismo de magnitud 7.5 y un esfuerzo vertical efectivo de 100 kPa, que puede ser calculada como:

$$CRR_{M=7.5} = \exp\left[\frac{(N_1)_{60,cs}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60,cs}}{126}\right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60,cs}}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60,cs}}{25.4}\right)^4 - 2.8\right] \quad (11)$$

En general, los parámetros necesarios para estimar la demanda sísmica (CRR) en el factor de seguridad contra licuefacción, se encuentran asociados a terremotos de magnitud 7.5. Por tanto, para sismos que difieren de dicha magnitud, se utiliza un factor de corrección, el factor MSF. Seed & Idriss (1982), Ambraseys (1988) y Arango (1996) han propuesto formas para obtener dicho valor en base a sus experiencias.

Sin embargo, para el desarrollo de este trabajo, se utiliza el método desarrollado por Idriss (1999), el cual es una reformulación de lo propuesta entregada por Seed & Idriss (1982), y busca comparar datos de muestras ensayadas en laboratorio con el número equivalente de ciclos uniformes producidos por un terremoto. Matemáticamente se expresa como:

$$MSF = \min\left(6.9 \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 0.058; 1.8\right) \quad (12)$$

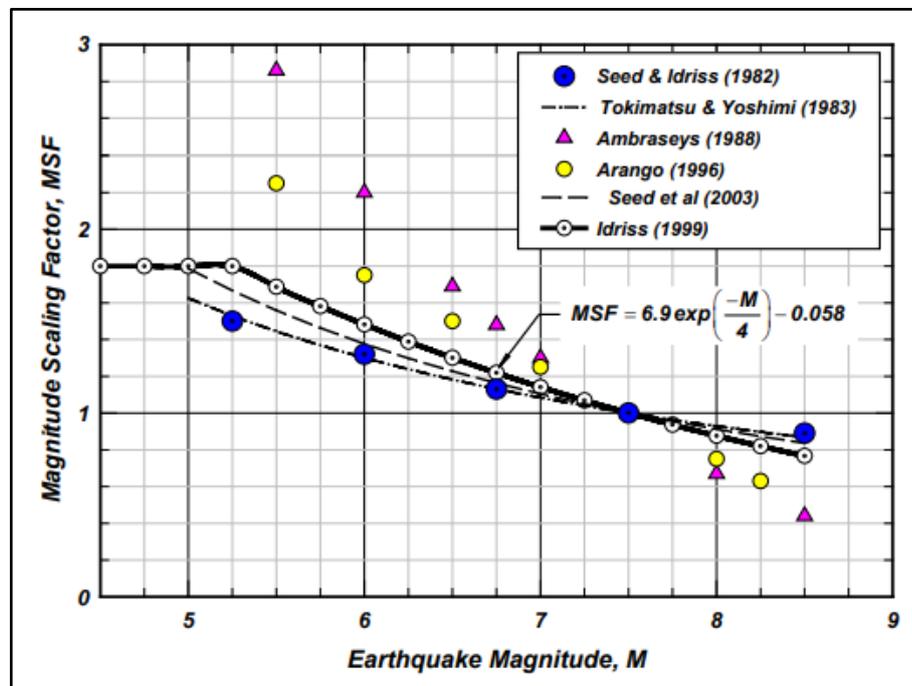


Figura 2: Magnitude scaling factor, MSF, valores propuestos por diversos investigadores. Idriss 1999

Cabe destacar que Idriss & Boulanger (2004) destacan que la fiabilidad de cualquier modelo de licuefacción depende directamente de la calidad de la

caracterización de suelo y de los procedimientos que se adoptan en terreno para obtener los datos.

Para la evaluación de la licuefacción por métodos dinámicos, es necesario conocer la forma en que interactúan el suelo con la pila, el cual es un proceso dinámico que involucra importantes cambios en las características del suelo y las cargas en el elemento durante un corto periodo de tiempo durante e inmediatamente después del sismo.

Algunas de las típicas respuestas del suelo fueron investigada por Cubrinovski, M. (2007), y se indican en la Figura 3. Durante el movimiento intenso del suelo en depósitos arenoso-saturados sueltos, el exceso de presión de poros se acumula rápidamente hasta que finalmente alcanza el nivel del esfuerzo efectivo y el suelo licua. El ejemplo que se muestra en la Figura 3, corresponde al terremoto de Kobe de 1995.

En dicha figura, se observan dos fases en ambos gráficos. La primera de ellas corresponde a la fase cíclica en donde, debido al rápido aumento de la presión de poros, se reducen los niveles de esfuerzos efectivos, lo que implica una reducción de la rigidez del suelo ocasionando deslizamientos horizontales en este. Por lo tanto, durante esta fase, se registran las mayores aceleraciones y desplazamientos, y se encuentra en desarrollo la licuefacción. En esta situación la pila se encuentra sometida a cargas cinemáticas significativas debido al movimiento lateral del suelo, junto con cargas inerciales por vibración de la estructura. Cabe notar la naturaleza cíclica y la amplitud relativamente grande de estos desplazamientos.

Posteriormente, existe una segunda fase en donde se generan deslizamientos horizontales que dependen de las condiciones de terreno. Estos desplazamientos son de una magnitud menor respecto a los desplazamientos en la fase cíclica del suelo, mientras que las cargas inerciales en esta fase son comparativamente pequeñas respecto a la anterior fase.

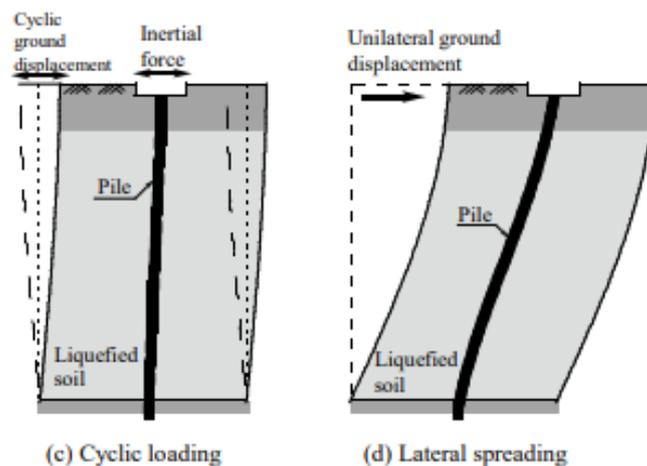
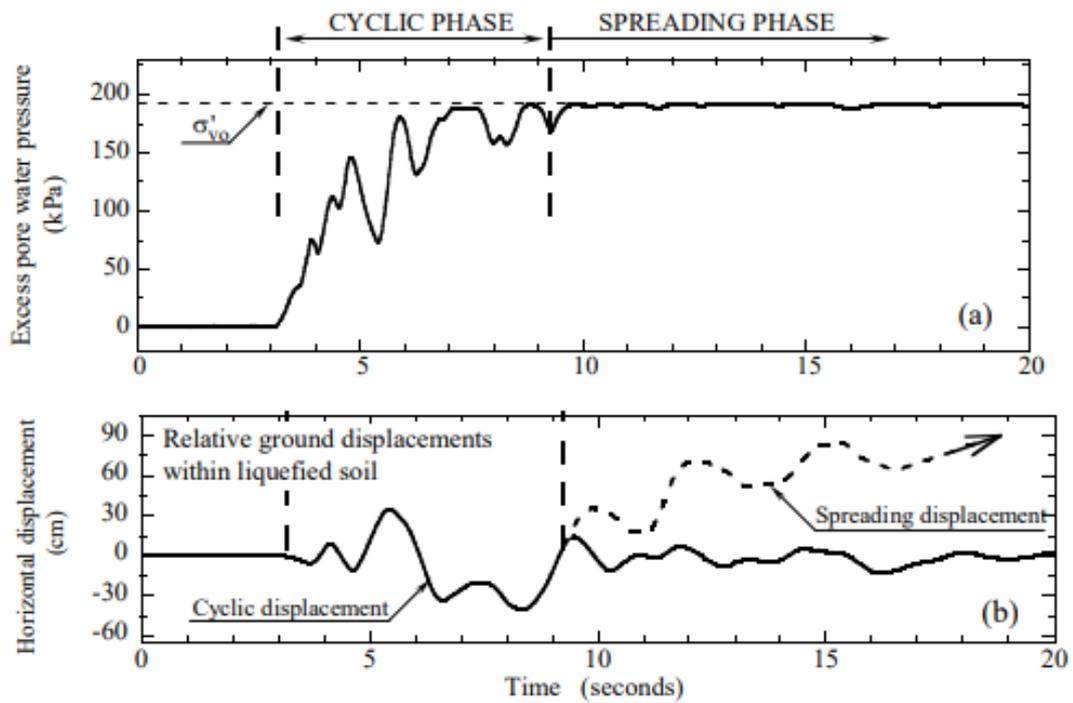


Figura 3: Ilustración de la respuesta del suelo y de interacción pila-suelo en suelos licuables: (a) Exceso de presión de poros; (b) Desplazamiento lateral del suelo; (c) Cargas en la pila durante cargas sísmicas (cyclic phase), y (d) Desplazamiento Post-licuefacción. Cubrinovski 2010

Por último, para poseer un valor estimativo del asentamiento en arenas debido a la licuefacción, se basa en lo propuesto por Ishihara, K., & Yoshimine, M. (1992), los cuales, a través de resultados de ensayos triaxiales, proponen una forma de cálculo para conseguir el asentamiento del suelo. Dichos autores proponen el cálculo en base al potencial de licuefacción (factor de seguridad), densidad relativa, la deformación volumétrica del estrato y de su profundidad.

Para obtener la densidad relativa de una arena in situ, se utilizan los resultados de los ensayos SPT y se establecen correlaciones empíricas

propuestas por Meyerhof (1957) entre la densidad relativa y el índice de penetración estándar $(N_1)_{60}$ del suelo. Así, la fórmula de esta expresión es:

$$DR = 21 \cdot \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{1,7}} = 16 \cdot \sqrt{(N_1)_{60}} \quad (13)$$

Ahora bien, al conocer la densidad relativa y el factor de seguridad del estrato, se determina la deformación volumétrica post-licuefacción utilizando la Figura 4.

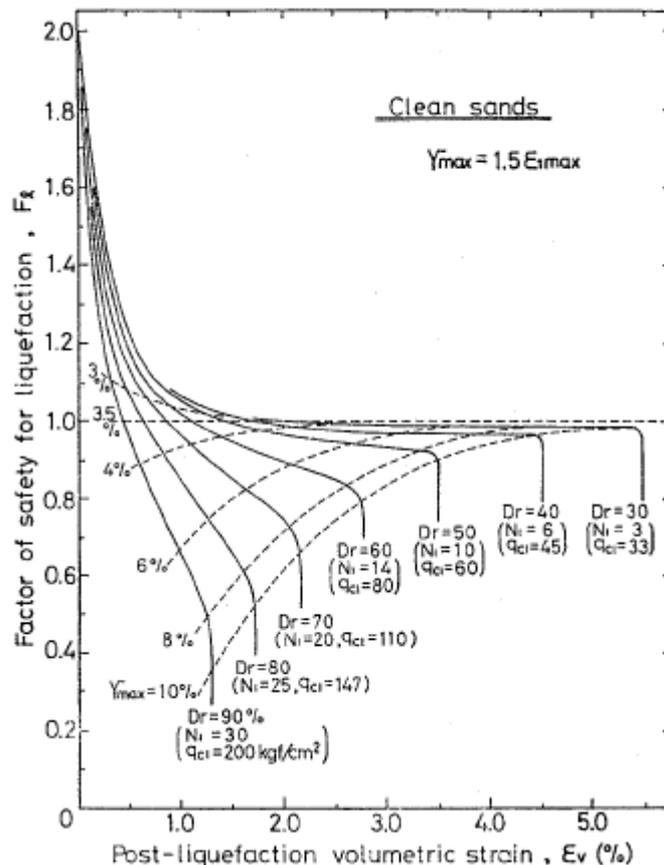


Figura 4: Gráfico para determinar la deformación volumétrica en función del factor de seguridad. Ishihara, K., & Yoshimine, M. 1992

Finalmente, al obtener el valor de este parámetro, se pondera dicho factor por la profundidad del estrato, obteniendo así el asentamiento en la superficie del suelo. Cabe destacar que este valor al ser determinado empíricamente no necesariamente determinara el verdadero comportamiento del suelo, pero si entrega un valor de referencia para tener una idea acerca del comportamiento esperado.

2.2. Modelos constitutivos del suelo

Un modelo constitutivo busca caracterizar el comportamiento a tensión-deformación del suelo. Daftari, A., & Kudla, W. (2014) destacan que dicho modelo puede llegar a ser más complicado dependiendo de los aspectos que son considerados en él. No obstante, se debe tener en cuenta que cualquier modelo de suelo, incluso el más complejo, es solo una

simplificación del real comportamiento del suelo, y, por lo tanto, incluyen cierto grado de limitaciones, las cuales se debe tratar de que sean las mínimas posibles.

PLAXIS 3D incorpora estos modelos constitutivos con el fin de realizar una correcta simulación del suelo en sus diferentes estados. Este software además realiza modelaciones basadas en elementos finitos para estimar, analizar y evaluar la estabilidad de deformaciones y otros aspectos en obras relacionadas con la ingeniería geotécnica.

Entre los modelos constitutivos que este programa posee, destacan dos de ellos: Hardening Soil HS Small y UBC3D-PLM, ya que son los que representan el comportamiento del suelo bajo condiciones dinámicas y considerando los distintos fenómenos asociados a este.

A continuación, se detallan los modelos constitutivos:

2.2.1. Hardening Soil

Al someter una probeta de suelo a una tensión desviadora, el suelo muestra un decrecimiento de rigidez, lo que provoca que se generen deformaciones plásticas irreversibles en el material. En el caso de un ensayo triaxial, la relación entre la deformación axial y la tensión desviadora se asemeja a una hipérbola. Esta relación fue formulada en un comienzo por Kondner (1963) y usada posteriormente por Duncan & Chang (1970) en su modelo.

El modelo Hardening Soil supera al primer modelo hiperbólico en tres aspectos. En primer lugar, se distingue por utilizar la teoría de la plasticidad en vez de la teoría de elasticidad. Además, incluye la dilatancia del suelo y, por último, se introduce una superficie de fluencia variable en el espacio (yield cap).

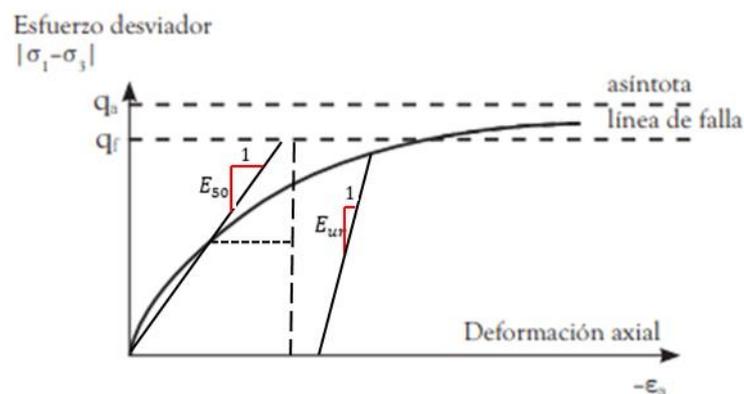


Figura 5: Relación hiperbólica esfuerzo-deformación para ensayos triaxiales. Fowler, A. C. 1997

En la figura anterior, q_a representa el valor asintótico de resistencia, y E_{50} es el módulo de deformación correspondiente al alcanzar el 50% de la tensión desviadora de falla q_f . La expresión que establece el esfuerzo desviador de falla es derivada del criterio de falla de Mohr-Coulomb

involucrando los valores de resistencia c y ϕ ; mientras que q_a resulta ser una fracción de q_f dada por la relación de falla R_f , como se describe en la siguiente expresión:

$$q_f = (p + c \cdot \cot(\phi)) \cdot \frac{6 \cdot \text{sen}(\phi)}{3 - \text{sen}(\phi)} \quad (14)$$

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (15)$$

De este modo, cuando $q = q_f$, el criterio de falla se satisface y la plasticidad perfecta ocurre, tal y como es establecido en el modelo de Mohr-Coulomb (Fowler, A. C, (1997)).

Finalmente, el modelo Hardening Soil simula el comportamiento del suelo en trayectorias de carga y descarga teniendo en cuenta la rigidez que presenta el suelo. Para ello, se define un módulo elástico E_{ur} . No obstante, el rango de deformación en el que se puede considerar el suelo realmente elástico es muy pequeño. Además, con el aumento de la deformación, la rigidez del suelo cae se reduce de manera no lineal. La Figura 6 otorga un ejemplo de una curva en donde se observa la disminución de la rigidez a medida que aumenta la deformación del suelo.

De igual forma, se incorpora la representación del estado deformacional del suelo en situaciones de compresión unidimensional mediante el módulo edométrico E_{oed} . También el modelo considera la dependencia de la rigidez del suelo en función de un estado de esfuerzos específicos (parámetro m). Estos parámetros constituyen el desarrollo fundamental del modelo.

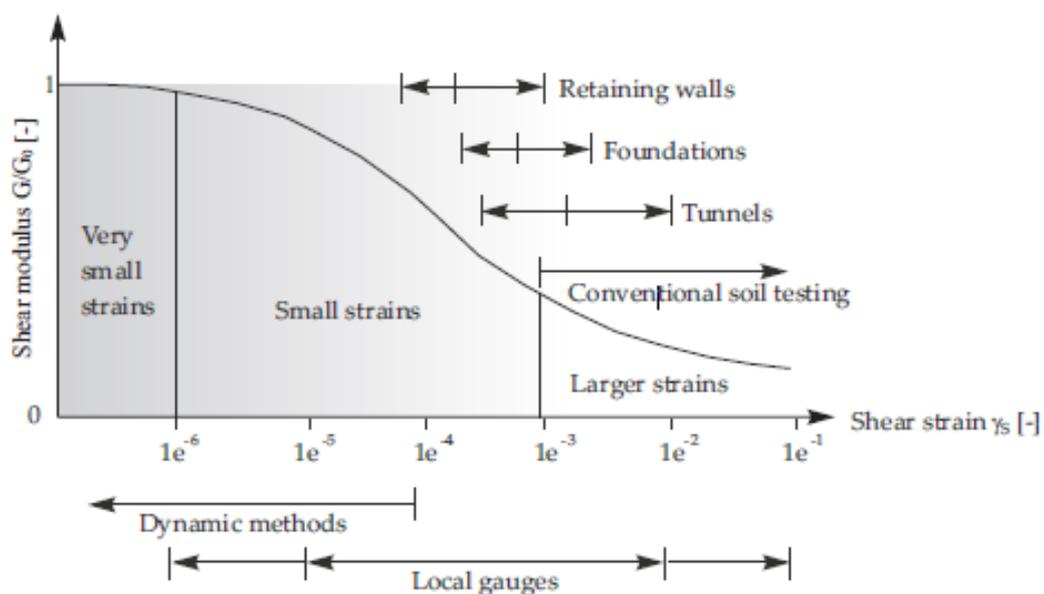


Figura 6: Comportamiento característico de rigidez-deformación del suelo con rangos de deformación típicos de ensayo de laboratorio y estructuras. Atkinson & Salfors 1991

Sin embargo, en condiciones dinámicas, se presenta una secuencia de carga y descarga debido a la carga cíclica a la que se encuentra sometida

la masa de suelo. Esto conlleva a un comportamiento irreversible del suelo. En general, esto se observa en los terremotos, los que inducen pequeñas deformaciones en el suelo, en donde se exhibe un alto valor de rigidez de corte inicial G_0 que decrece a medida que la cantidad de energía disipada aumenta al incrementar deformación de corte.

Para tomar en cuenta estos aspectos, es que se utiliza el modelo Hardening Soil HS small, el cual corresponde a una extensión del Hardening soil, en donde solo se incluyen dos nuevas variables: Una alta rigidez en pequeñas deformaciones G_0 , y la deformación de corte en que G se ha reducido en un 70% de la rigidez de corte inicial G_0 ($\gamma_{0.7}$).

La dependencia de este valor queda expresada por:

$$G_0 = G_0^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos(\phi) - \sigma'_3 \cdot \sin(\phi)}{c \cdot \cos(\phi) + p^{ref} \cdot \sin(\phi)} \right)^m \quad (16)$$

El típico comportamiento histerético se muestra en la Figura 7. La rigidez de corte tangente (G_t) y secante (G_s) al comienzo de la curva coinciden con la máxima rigidez de corte G_0 . Sin embargo, mientras aumenta la deformación de corte, se observa que la rigidez decae.

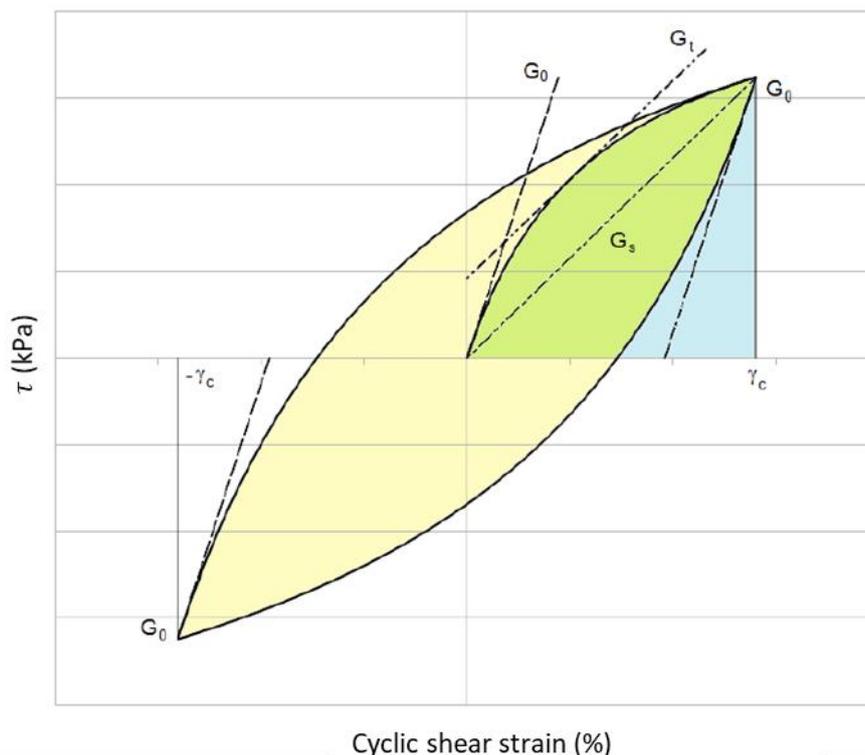


Figura 7: Comportamiento histerético clásico del suelo. Laera, A., & Brinkgreve, R. B. J. 2015

Para calibrar estos parámetros se utilizan resultados de ensayos triaxial otorgados por Brinkgreve, Kumarswamy, S., & Swolfs, W. M. (2006), quienes realizaron ensayos para muestras de arena densa y suelta,

valores que son adaptados y usados de referencia para el estrato de arena competente.

Para finalizar, el modelo establece un total de 13 parámetros, los cuales se describen a continuación:

Tabla 2: Parámetros modelo Hardening Soil HS small

Parámetro	Unidad	Descripción
E_{50}	kN/m ²	Rigidez secante en ensayos triaxiales
E_{oesd}	kN/m ²	Rigidez tangente para carga primaria edométrico
E_{ur}	kN/m ²	Rigidez en descarga-recarga
m	-	Dependencia de la rigidez al estado de esfuerzos
c	kN/m ²	Cohesión
ϕ_{cv}	°	Ángulo de fricción interna
ψ	°	Ángulo de dilatancia
K_0	-	Coefficiente de presión lateral de tierras
P_{ref}	kN/m ²	Presión de referencia
R_f	-	Relación de falla
ν_{ur}	-	Relación de Poisson en descarga-recarga
$\gamma_{0.7}$	-	Deformación de corte en que $G_s = 0.722G_0$
G_0^{ref}	kN/m ²	Módulo de corte para pequeñas deformaciones

2.2.2. UBC3D-PLM

Este modelo se utiliza para analizar y predecir la respuesta de un suelo arenoso que se encuentra sometido a una sollicitación dinámica con el fin de estudiar el fenómeno de licuefacción. Este modelo es una extensión en 3D del UBCSAND que fue introducido por Puebla et al (1997) y desarrollado por Tsegaye (2010). Posteriormente, autores como Beaty y Byrne (2011) y Petalas et al (2012) han introducido modificaciones para que el modelo pueda reproducir con mayor precisión el comportamiento de un suelo bajo cargas dinámicas y cíclicas.

De manera similar al modelo UBCSAND original, UBC3D-PLM es un modelo de tensiones efectivas basado en la teoría de la plasticidad clásica con una regla de endurecimiento hiperbólico (Makra (2013)). La principal diferencia con UBCSAND es que UBC3D-PLM utiliza el criterio de Mohr-Coulomb en 3-D en lugar de 2-D para caracterizar adecuadamente la respuesta elástica y plástica del suelo ante cargas cíclicas.

La respuesta elástica se presenta cuando el suelo se encuentra en estado de descarga, y dicho comportamiento se caracteriza con los módulos de corte G^e y de compresibilidad K^e .

Por otro lado, el rango plástico cuenta con una regla de flujo no asociada que permite obtener las deformaciones a partir de la función de la superficie de potencial plástico. Los incrementos de deformación plástica estarán relacionados con los incrementos de la razón de tensiones mediante una constitutiva hiperbólica.

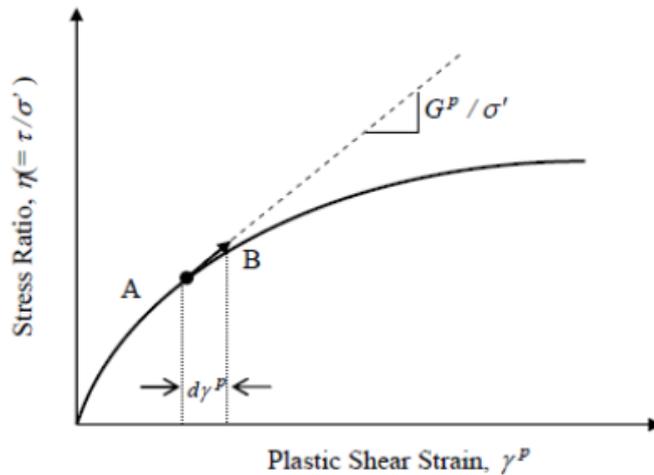


Figura 8: Ley de endurecimiento hiperbólica. Beaty & Byrne 2011

La ley de endurecimiento se encuentra caracterizada por el módulo de corte plástico G^P y el número de ciclos de carga y descarga. Además, el comportamiento post licuefacción se basa en la degradación de la rigidez del suelo. Es decir, se utiliza un módulo de compresibilidad plástico K_G^p , el cual decrece en función de la deformación plástica generada durante la dilatación del suelo.

Una de las limitaciones del modelo es que este no puede generar apropiadamente los esfuerzos iniciales debido a cargas gravitacionales (peso propio del suelo). Además, mientras mayor sea la solicitante cíclica (CSR), se produce una mayor evolución del exceso de presión de poros durante el primer ciclo completo debido a que no se tienen en cuenta los efectos de consolidación anisotrópica del material durante la carga primaria. La capacidad de reproducir con alta precisión las rutas de esfuerzo cíclico que inician desde la línea isotrópica es presentada por Petalas et al (2012).

Investigaciones realizadas por Makra (2013), Petalas y Galavi (2013), Tsegaye (2010), demuestran que el modelo UBC3D-PLM, ante cargas dinámicas, amortigua en exceso la respuesta del suelo en comparación con el comportamiento real de este. Esto se debe principalmente a la ley de descarga elástica del modelo con un módulo de corte constante igual a G_{max} . Estos resultados conducen a grandes áreas calculadas que se generan en la respuesta histerética del suelo, lo cual, no se compara a los resultados entregados por los ensayos triaxiales cíclicos.

Para enfrentar este problema, Petalas et al (2012) propusieron una manera de reproducir correctamente el comportamiento de licuefacción, el que consiste en utilizar otro modelo constitutivo en las fases iniciales para asegurar una correcta definición de estos esfuerzos.

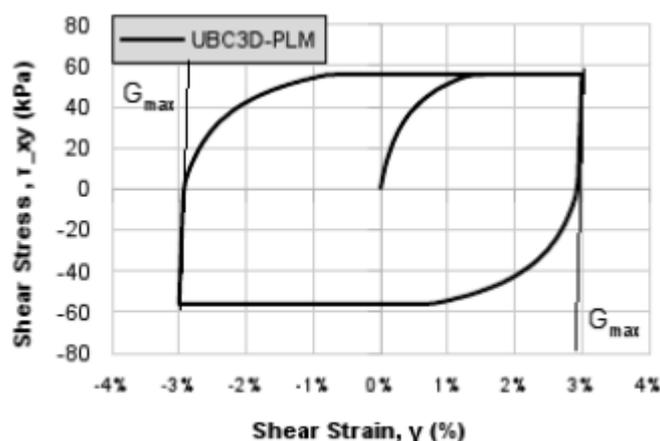


Figura 9: Sobre amortiguamiento generado por el modelo UBC3D-PLM durante las descargas. Petalas et al 2012

Otro aspecto por considerar es que, para profundidades mayores a 15 metros, el modelo muestra imprecisiones al modelar la licuefacción debido a que no considera la heterogeneidad del suelo y el mayor grado de confinamiento que presenta este a mayores profundidades. Sin embargo, esto no debiese generar problemas debido a que se recomienda el estudio de este fenómeno a profundidades menores a 15 metros.

Los parámetros que requiere el modelo para caracterizar el suelo se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Parámetros modelo UBC3D-PLM

Parámetro	Unidad	Descripción
K_B^e	-	Módulo de compresibilidad elástico
K_G^e	-	Módulo de corte elástico
K_G^p	-	Módulo de compresibilidad plástico
m_e	-	Razón de dependencia de esfuerzos del módulo elástico de compresibilidad
n_e	-	Razón de dependencia de esfuerzos del módulo elástico de corte
n_p	-	Razón de dependencia de esfuerzos del módulo plástico de corte
P_{ref}	kN/m ²	Presión de referencia
ϕ_{cv}	°	Angulo de fricción de volumen constante
ϕ_p	°	Angulo de fricción peak
c	kN/m ²	Cohesión
σ_t	kN/m ²	Resistencia a la tracción y límite de tensión
R_f	-	Razón de falla
$(N_1)_{60}$	-	Índice de penetración estándar corregido
f_{dens}	-	Factor de densificación
f_{post}	-	Factor de post-licuefacción

Donde se recomiendan valores de m_e , n_e y n_p igual a 0.5, 0.5 y 0.4 respectivamente. Además, se sugiere escoger un factor de densificación f_{dens} de 0.45 y un coeficiente de 0.02 para f_{post} según ensayos de triaxiales no drenados de arenas sueltas, realizados por Makra (2013).

Las siguientes ecuaciones propuestas por Beaty & Byrne (2011) sirven para generar una calibración inicial en el modelo a partir del índice de penetración estándar corregido:

$$\phi_p = \phi_{cv} + \frac{(N_1)_{60}}{10} + \max(0; \frac{(N_1)_{60} - 15}{5}) \quad (17)$$

$$K_G^e = 21.7 \cdot 20 \cdot (N_1)_{60}^{0.3333} \quad (18)$$

$$K_B^e = 0.7 \cdot K_G^e \quad (19)$$

$$K_G^p = K_G^e \cdot (N_1)_{60}^2 \cdot 0.003 + 100 \quad (20)$$

$$R_f = 1.1 \cdot (N_1)_{60}^{-0.15} \quad (21)$$

UBC3D-PLM es capaz de calcular el inicio de la licuefacción utilizando el índice de exceso de presión de poros r_u , como la principal variable de estado. En este modelo constitutivo, y en general en la mayoría de los modelos que se utilizan para estudiar la licuefacción, la generación de presiones de poros y el cálculo de las deformaciones por corte durante la carga sísmica, se ve afectada por la rotación de los esfuerzos principales, lo cual corresponde a un problema intrínseco en la implementación de los modelos numéricos relacionados con la licuefacción. Esta característica es bastante limitada en el modelo UBC3D-PLM (Vaid et al., 1995).

Por último, se define el índice de exceso de presión de poros r_u , el cual relaciona la presión de poros y el esfuerzo vertical inicial del suelo. Matemáticamente se representa:

$$r_u = 1 - \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{v0}} \quad (22)$$

Donde σ'_v es el esfuerzo efectivo vertical al final de los cálculos dinámicos, y σ'_{v0} es el esfuerzo vertical efectivo antes de aplicar la carga dinámica. Además, cuando r_u es igual a 1, la presión de poros acumulada ha igualada en magnitud al esfuerzo efectivo inicial, lo que significa que la capa de suelo ha licuado. Sin embargo, Beaty & Perlea (2011) consideran que para valores de mayores a 0.7 el suelo ya se considera en este estado.

Finalmente, para calibrar este mismo tipo de arena en el modelo constitutivo Hardening Soil, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$G_o^{ref} = K_G^e \cdot p_{ref} \quad (23)$$

$$G_{ur} = \frac{1}{3} G_o^{ref} \quad (24)$$

$$E_{ur} = 2(1 + \nu_{ur}) \cdot G_{ur} \quad (25)$$

$$E_{oed} = E_{50} = \frac{1}{3} E_{ur} \quad (26)$$

Donde ν_{ur} es igual a 0.2, y se considera el coeficiente m como 0.5 para arenas

2.3. Micropilotes

En el último tiempo, los micropilotes se han incorporado como un sistema de fundación versátil y fiable. Respecto a esta solución en suelos licuables, se ha demostrado que este sistema mejora las propiedades mecánicas del suelo.

Moayed (2011) estudió el efecto que generan los micropilotes para mejorar las propiedades de un depósito de arena suelta. En su investigación consideró micropilotes de 75 mm de diámetro y de 15-20 metros de largo, y en base a resultados de SPT, demostró que después de la instalación de los micropilotes, las propiedades del suelo fueron mejoradas, junto con su potencial de licuefacción y un aumento considerable en el módulo de reacción lateral del suelo. Además, Seyed & Reza (2006), demostraron con ensayos in situ, que los micropilotes redujeron el potencial de licuefacción de un suelo.

Shahrour & Juran (2004) concluyeron que la licuefacción tiene dos consecuencias para los micropilotes. Una de ellas es que, al ocurrir este fenómeno, existe una reducción tanto de la rigidez como de la resistencia del suelo que rodea a los micropilotes, lo que resulta en un aumento de la carga soportada directamente por estos elementos. Otra consecuencia es que, durante la licuefacción, el flujo lateral del suelo induce una carga adicional significativa en los micropilotes, que deben resistir la carga de dicho flujo.

Por otra parte, Mared & Muhuntham (2005) mencionan que el comportamiento no lineal del suelo tiene influencia significativa en la respuesta de los micropilotes a la carga, por lo que, en un suelo altamente no lineal, se tienen asentamientos más grandes en comparación al caso lineal y una reducción en el módulo lateral.

Ahora bien, el diseño de estos elementos se encuentra controlado por factores de capacidad de cargas externa y de carga interna. Sin embargo, al estudiar la interacción que se genera en suelos licuables, estudios y modelos matemáticos desarrollados por Bjerrum (1957), Mascardi (1970, 1982) y Gounvenot (1975) indican que los micropilotes son susceptibles al

pandeo debido a la esbeltez que presentan y por las pobres propiedades mecánicas que muestran estos suelos.

Cadden (2002) menciona que el pandeo en los micropilotes es una interacción compleja que ocurre a nivel de suelo-estructura que involucra el tamaño del elemento y sus propiedades elásticas, la rigidez y resistencia del suelo y de la excentricidad de la carga aplicada. Además, este autor se basa en lo propuesto por Bjerrum (1957) para plantear lo siguiente:

$$E_s \leq \frac{1}{\left[\left(4 \cdot \frac{I}{A^2} \right) \cdot \left(\frac{E}{f_y^2} \right) \right]} \quad (27)$$

Donde:

E : Módulo de elasticidad del material

I : Mínimo momento de inercia de la pila

A : Área de la sección

f_y : Fluencia del material

E_s : Módulo de reacción lateral del suelo

De la última ecuación se observa que el primer término en el denominador corresponde a las propiedades geométricas de la pila, mientras que el segundo término representa las propiedades del material. Además, se define un valor crítico de E_s , donde, si es mayor a la rigidez actual del suelo, el pandeo deberá ser evaluado.

Otro punto que destacar en la ecuación (27), es que no se considera el efecto de la lechada para evaluar el pandeo en el elemento, lo cual aportaría rigidez al micropilote.

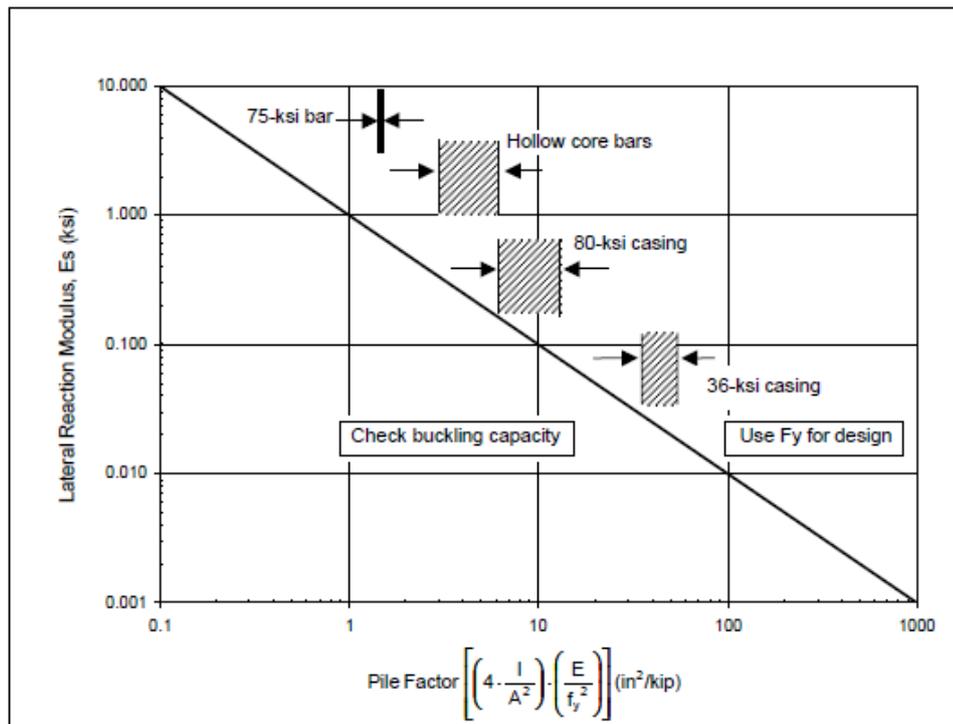


Figura 10: Gráfico para evaluar el pandeo de micropilotes. En el Eje X se ingresa las propiedades del elemento en in²/kip; y en el Eje Y el módulo de balasto del suelo licuado (ksi). Cadden 2002

Si al utilizar el ábaco presente en la Figura 10 se encuentra en la zona en donde se debe chequear el pandeo del elemento, se recomienda utilizar lo propuesto por Davisson y Robinson (1965) para definir la carga crítica de pandeo P_{cr} , con el fin de conseguir un valor referencial para este fenómeno

Davisson y Robinson (1965), realizaron un modelo que proporciona una relación entre la rigidez del suelo, la relación de empotramiento de la pila, y su profundidad de fijeza.

Estos autores consideran un largo efectivo de empotramiento para evaluar la condición de pandeo, debido a que, desde cierta profundidad, la deformación de la pila comienza a ser insignificante en comparación a la sección superficial de ella. En la imagen a continuación se muestra el modelo equivalente a considerar:

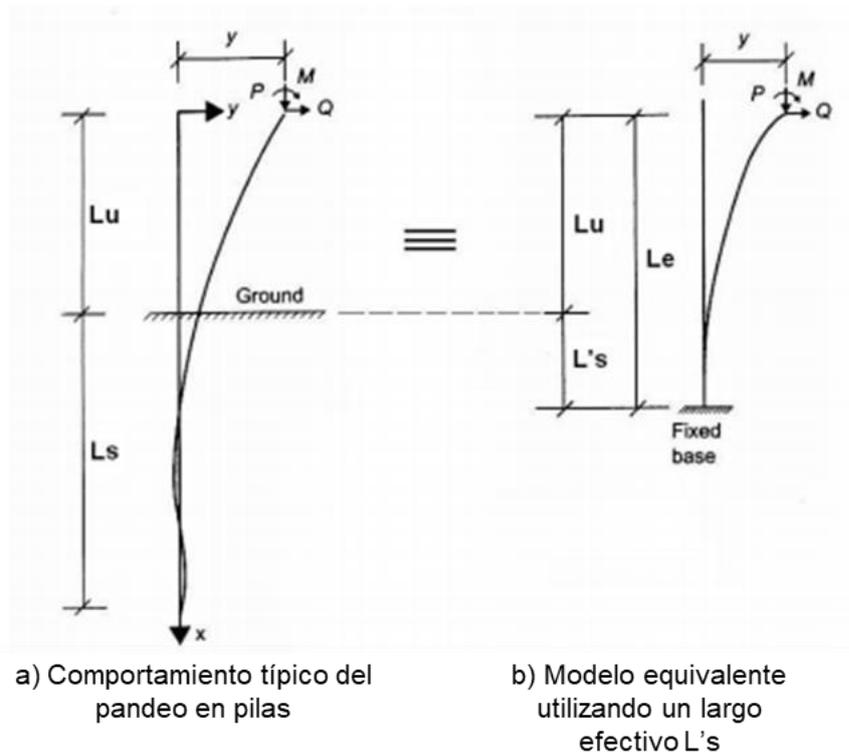


Figura 11: Modelo equivalente propuesto por Davisson y Robinson (1965)

El largo efectivo $L's$ para arenas se define como:

$$L's = 1.8 \cdot \sqrt[5]{\frac{E_p \cdot I_p}{k_{hn}}} \quad (28)$$

En donde E_p es el módulo elástico de la tubería de acero, I_p a la inercia de esta, y k_{hn} al coeficiente de balasto.

Una vez determinado el largo efectivo, se prosigue a determinar la carga crítica de pandeo P_{cr} , que viene dado por:

$$P_{cr} = \pi^2 \cdot \frac{E_p \cdot I_p}{(Lu + L's)^2} \cdot k \quad (29)$$

Al considerar que los esfuerzos axiales, de corte y de momento se transmiten a la cabeza del micropilote por medio del dado de fundación, no se considera el largo Lu (indicado en la Figura 11) en la ecuación anterior. Además, k representa el factor de longitud de pandeo utilizado en los cálculos estructurales.

Finalmente, existen distintas normas internacionales donde consideran que se debe chequear la ocurrencia de pandeo si el suelo presenta una resistencia no drenada menor a 10 o 15 kPa. (dependiendo de la norma). No obstante, esto implica que el pandeo no ocurre cuando se tienen resistencia no drenadas mayores a esos valores, sin embargo, Vogt (2009), demostró que dicha suposición ha quedado invalidada en elementos esbeltos como los micropilotes.

Respecto al modelamiento de los micropilotes en PLAXIS 3D, y según lo propuesto por Dao, T. P. T. (2011), se utilizan los elementos *embedded beam*. Dichos elementos son considerados como una viga que puede cruzar los elementos de volumen del suelo en cualquier dirección arbitraria y con cualquier orientación arbitraria, tal y como se muestra en la Figura 12. Además, la pila se encuentra conectada a los suelos circundantes a través de la resistencia de fuste y punta que presenta el elemento.

Otro aspecto por destacar es que estos elementos asumen un volumen elástico alrededor de la pila (zona elástica) cuya dimensión es equivalente al diámetro de la pila, en el que no se toma en cuenta el comportamiento plástico (Figura 12). Esto último hace que la pila se comporte como un elemento volumétrico. No obstante, los efectos de instalación no son consideradas por estas pilas (Brinkgreve et al. (2015)). Esto implica que esta pila se puede aplicar de manera efectiva en el modelamiento de pilotes en los que el proceso de instalación da como resultado una perturbación baja, como es el caso de los micropilotes.

En comparación con otros elementos de pila en dicho software, resulta que este es el que presenta una mayor cantidad de beneficios en términos de tiempo y simplificación de la geometría del problema. Los datos para generar un modelo adecuado acerca del comportamiento del elemento micropilote dependen de la interacción suelo-pila, la influencia del coeficiente de roce del suelo, y los parámetros requeridos del material.

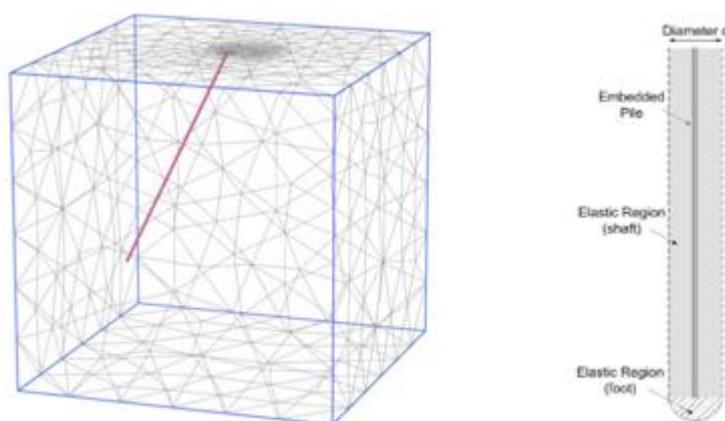


Figura 12: Esquematización de una pila "embedded beam" en PLAXIS 3D. A la izquierda se muestra el elemento en cualquier ubicación y posición arbitraria, y a la derecha las zonas que componen el elemento. Dao, T. P. T. 2011

Respecto a la interacción suelo-pila, se utiliza un modelo elasto-plástico para describir el comportamiento en las interfaces. Como se mencionó anteriormente, la interacción de este estilo involucra la resistencia de fuste y la resistencia de punta. Para ambos casos existe un criterio de falla para distinguir entre el comportamiento elástico y plástico.

En PLAXIS 3D, la resistencia del fuste se puede describir mediante modelos de tracción lineales, multilineales o dependientes del suelo.

Dentro de la tercera opción, la resistencia de fuste se relaciona directamente con la resistencia del suelo circundante mediante el coeficiente de roce, el cual depende de las propiedades del suelo.

Cabe destacar que este modelo posee numerosas validaciones que fueron realizadas por autores como Kelesonglu (2009) y Engin et al (2007) para observar la respuesta de estos elementos en PLAXIS 3D sujetos a compresión, tracción y carga lateral.

Los principales parámetros para calibrar adecuadamente estos elementos corresponden al módulo de Young [kN/m^2], el diámetro de bulbo del micropilote [m], y al peso específico del material [kN/m^3].

3. REVISIÓN DE PROYECTOS

Se realiza una revisión de proyectos en los que se estudió la solución de micropilotes para remediar capas licuables. Se analizó una cantidad de cuatro proyectos, de los cuales tres fueron realizados en la zona centro-sur de Chile, en la VIII región, y uno de ellos se estudió para su realización en la XI región. Además, de estos proyectos, la mitad fueron desarrollados con la propuesta de micropilotes y para el resto se utilizó otra alternativa.

El objetivo de esta revisión es conseguir los parámetros necesarios para comenzar a modelar el suelo en PLAXIS 3D. Para ello, se utilizan los resultados de los ensayos SPT, los que arrojan que la mayor parte de esos proyectos se encuentran fundados sobre arenas limpias, de compacidad media a alta (en aumento según profundidad). Además, al tener el número de golpes, se puede calcular el CSR para distinguir los estratos potencialmente licuables.

Por otra parte, también se obtienen los parámetros para modelar la estructura, que será de utilidad para conseguir las cargas. Con esto, se puede realizar el diseño de micropilotes. A partir de los casos revisados, se pretende representar una estructura liviana (un puente peatonal). Por lo que se pretende efectuar un modelo simplificado a partir de la columna más desfavorable que se observa en la documentación del proyecto obtenida.

Para finalizar, a partir de este modelo se consigue una aproximación del periodo fundamental de la estructura.

3.1. Pasarela Playa Blanca Sur

Corresponde a una pasarela peatonal emplazada en la ruta 160CH en el tramo Coronel-Tres pinos, en la VIII Región de Chile. Respecto a su estratigrafía, destaca que entre los 2.3 m y los 7.1 m de profundidad, se encuentra un estrato de arenas finas a medias, prácticamente sin finos, con compacidad media a alta y un índice de penetración estándar NSPT igual a 12 golpes. Desde los 8.3 m se detecta el inicio de roca y el nivel freático se encontraba a los 1.4 m.

Este proyecto fue diseñado en noviembre del 2011, y no fue fundado con micropilotes. Las alternativas que se presentaron para realizar las fundaciones fueron por medio de fundación directa, el que consistía en retirar el estrato potencialmente licuable (entre los 2.3 m y los 3.5 m de profundidad) y colocar un relleno granular que sería compactado hasta obtener un 90% de densificación. Otro método era por medio de pilotes y fundar hasta alcanzar el estrato competente.

3.2. Pasarela Parque el Coronel

Al igual que el caso anterior, corresponde a una pasarela ubicada en la ruta 160CH en las cercanías del parque Coronel. Los sondeos detallan que el estrato más superficial (comienza a los 2 metros) está constituido por arenas medias a gruesas, prácticamente sin finos, humedad alta, compacidad alta y un NSPT que varía entre 23 y 41 golpes. Este estrato se extiende hasta los 7.0 m de profundidad. Luego de este estrato, comienza otra capa de arena finas a medias, pero cuyo NSPT es superior a los 60 golpes. El nivel freático se ubica a los 1.82 m hasta esa fecha.

El proyecto fue aprobado para su construcción en mayo del 2012. Para este caso, las fundaciones fueron realizadas por medio de pilotes. Sin embargo, se presentó una alternativa con micropilotes, la cual no prosperó debido a la incertidumbre que generaba el fundar en suelos que presentan capas licuables con este sistema.

3.3. Pasarela proyecto IBAHT de Moly-Cop

Esta pasarela se ubica en la región de Talcahuano, en la región de Bio Bio. El suelo presente en el sitio corresponde a arenas limpias de compacidad media a alta (en aumento según profundidad) y con presencia del nivel freático entre los 1.3m y 1.9m. Existen estratos superficiales que son licuables y se extienden en capas en los primeros 8 metros de profundidad, por lo que se requirió un sistema de fundación especial. Este proyecto consiguió su aprobación en mayo del 2014.

En este caso, el sistema con el que se realizó consta de zapatas aisladas con micropilotes, donde se ejecutó el diseño considerando la posibilidad de que estos puedan pandear debido a la gran diferencia de rigideces que presentan el estrato arenoso y la roca que subyace. Para ello se utiliza lo establecido por Cadden 2002. Además, se consideran grandes factores de seguridad (sobre 2) para controlar la incertidumbre que surge al fundar con este método.

3.4. Hospital Chile Chico

Este proyecto correspondía a un sistema de refuerzo en base a micropilotes a las fundaciones de un hospital ubicado en Chile Chico, en la región de Aysén. Es uno de los proyectos estudiados más recientes, ya que se comenzaron a realizar los cálculos en el año 2017. Sin embargo, dicho proyecto no se llevó a cabo debido a problemas de financiamiento.

El suelo que se encuentra en esta zona corresponde a limos arenosos, con compacidad alta y estructura de origen natural, con un NSPT que varía entre los 5 y 15 golpes. El nivel freático se encuentra entre los 4.0 y 7.0 metros de profundidad y a partir de los 8.0 m se tiene una mejora en el número de golpes.

La cantidad y disposición de los micropilotes varía dependiendo de las cargas que generaba la estructura superior en cada fundación. Sin embargo, para el diseño de pandeo de estos elementos, a diferencia del

proyecto anterior, se utilizó la fórmula de Bjerrum y no lo obtenido recientemente por Cadden 2002.

Es necesario destacar que todos los proyectos fueron realizados posterior al terremoto del 2010. En especial, las estructuras que han sido fundadas con micropilotes en la octava región no han sido sometidas a una gran sollicitación sísmica los últimos años, por lo que se desconoce la verdadera efectividad de este método en Chile. No obstante, se espera que el comportamiento sea el adecuado debido a los resguardos que se utilizan al momento del diseño.

Ahora bien, a partir de los resultados de los ensayos SPT que poseía cada proyecto, se realizó un análisis de licuefacción para encontrar los estratos potencialmente licuables. Al identificar las secciones en todos los proyectos, se realizó un promedio del NSPT de los estratos licuables y no licuables que fueron seleccionados para generar un modelo representativo del suelo. Es importante destacar que el NSPT es necesario para poder calibrar adecuadamente los modelos constitutivos en PLAXIS 3D, en especial el UBC3D-PLM. El detalle de cálculo se encuentra adjunto en el Anexo A.

Así, se obtuvo que para el estrato licuable en PLAXIS 3D se escoge un NSPT de 13, con un ángulo de fricción de 30° y un peso específico seco de 17 y saturado de 18 kN/m^3 . En cambio, para el estrato no licuable, se obtuvo un NSPT de 36, un ángulo de fricción asociado de 37° y un peso específico un poco superior al anterior (18 y 19 kN/m^3 respectivamente).

Tabla 4: NSPT promedio por estrato

Proyecto	Estrato Licuable [-]	Estrato No licuable [-]
Pasarela Moly-Cop	16	31
Pasarela Playa Blanca Sur	9	32
Pasarela Parque el Coronel	18	30
Hospital Chile Chico	7	50
<i>Promedio</i>	<i>13</i>	<i>36</i>

Respecto al nivel freático, este se definirá en el sello de fundación de la estructura a modelar, el cual se ubicará a 1.35 metros de profundidad. Dicho valor se elige en base a los niveles freáticos de los proyectos revisados, los cuales se encuentran entre 1 y 2 metros bajo la superficie.

A partir del número de golpes y las correlaciones vistas anteriormente, se definen los parámetros para utilizar en el modelo constitutivo UBC3D-PLM para el estrato licuable. Dichos valores se adjuntan en la siguiente tabla:

Tabla 5: Valores para calibrar modelo constitutivo UBC3D-PLM

Parámetro	Valor
K_B^e	705
K_G^e	1007
K_G^p	572
m_e	0.5
n_e	0.5
n_p	0.4
P_{ref}	100
ϕ_{cv}	30
ϕ_p	31
c	0
σ_t	0
R_f	0.75
$(N_1)_{60}$	13
f_{dens}	0.45
f_{post}	0.02
K_o	0.5

Una vez que se definen estos valores, se procede a calibrar los parámetros para el modelo constitutivo Hardening Soil para el estrato licuable, con el fin de generar una adecuada condición inicial, tal como se mencionó en el marco teórico. Para ello, se utilizan las ecuaciones (23), (24), (25) y (26) para generar el modelo equivalente de esta arena en Hardening Soil. Así, se tienen los siguientes valores:

Tabla 6: Valores para calibrar modelo constitutivo Hardening Soil, condición inicial de estrato licuable

Parámetro	Valor	Unidad
E_{50}	26857	kN/m ²
E_{oed}	26857	kN/m ²
E_{ur}	80571	kN/m ²
m	0.5	-
c	0	kN/m ²
ϕ_{cv}	30	°
ψ	1	°
K_o	0.5	-
P_{ref}	100	kN/m ²
R_f	0.75	-
u_{ur}	0.2	-

Finalmente, se definen las propiedades del suelo no licuable por medio del modelo constitutivo Hardening Soil:

Tabla 7: Valores para calibrar modelo Hardening Soil, estrato no licuable [Fuente: Brinkgreve, Kumarswamy, S., & Swolfs, W. M. (2006),]

Parámetro	Valor	Unidad
E_{50}	35000	kN/m ²
E_{oed}	35000	kN/m ²
E_{ur}	105000	kN/m ²
m	0.5	-
c	0	kN/m ²
ϕ_{cv}	37	°
ψ	7.5	°
K_0	0.395	-
P_{ref}	100	kN/m ²
R_f	0.9	-
ν_{ur}	0.2	-

De la revisión de proyectos también se extrae información para definir la estructura que soportará el suelo y que será modelada en PLAXIS 3D. Para lograr representar de manera adecuada la estructura en PLAXIS 3D, se realiza un modelo simplificado de la pasarela en ETABS para conseguir el periodo fundamental. Dicho modelo se realizó en base a los planos y elevaciones disponibles de proyectos anteriores. En especial, se decide utilizar el plano de la pasarela fundada en Talcahuano (pasarela Parque el Coronel) debido a que contiene la información necesaria para realizar el diseño de micropilotes de manera apropiada.

El objetivo de realizar el modelo en ETABS es conseguir la frecuencia de vibración de la estructura para poder representarlo mediante una estructura en PLAXIS 3D que conste de una columna de largo L y que posee una masa en su extremo M, que vibre de manera similar a lo que se obtuvo en ETABS.

La pasarela consta de 3 cepas separadas aproximadamente a 20 metros cada una. Cada cepa posee dos tipos de combinaciones de carga para el sismo en X y el sismo en la dirección Y.

- $1,3 \cdot (S_x + 0,33 \cdot S_y + 0,75 \cdot (PP + 0,25 \cdot SC))$
- $1,3 \cdot (S_y + 0,33 \cdot S_x + 0,75 \cdot (PP + 0,25 \cdot SC))$

En total existen 6 combinaciones de cargas de diseño que son entregadas por el calculista. De forma de simplificar el problema, se diseña una única fundación con solo una configuración de micropilotes para la totalidad de las combinaciones de cargas, las cuales se detallan a continuación:

Tabla 8: Combinaciones de cargas de diseño para fundación tipo [Fuente: Memoria de cálculo proyecto Pasarela Parque Coronel (2012)]

	Comb1	Comb2	Comb3	Comb4	Comb5	Comb6
Fx (ton)	9.42	9.76	6.68	3.14	3.26	2.23
Fy (ton)	3.14	3.26	2.23	9.42	9.76	6.68
Fz (ton)	-48.73	-50.01	-38.46	-48.73	-50.01	-38.46
Mxx (ton*m)	-19.65	-29.06	-18.01	-58.95	-78.77	-48.05
Myy (ton*m)	62.95	75.57	45.06	23.65	24.86	15.02
Mzz (ton*m)	0	0	0	0	0	0

Respecto a las características del micropilote en el modelo, se define el módulo de Young a partir de las propiedades de los materiales que componen este elemento, los cuales corresponden a lechada de cemento y el perno de acero. El módulo de deformación equivalente se calculó mediante la siguiente expresión:

$$E_{EQ} = \frac{(E_{ACERO} \cdot A_{ACERO} + E_{LECHADA} \cdot A_{LECHADA})}{A_{TOTAL}} \quad (30)$$

En donde el módulo de Young equivalente se define a partir de las características del perno a utilizar, es decir, del módulo de Young de la lechada y su área correspondiente, y de las características y datos técnicos del elemento de acero, los que dependerán del tipo de perno a utilizar en el diseño.

El peso específico que se utiliza corresponde a 25 kN/m², el que se asocia principalmente a la lechada con la que se encuentra conformada el elemento. El resto de los parámetros se ajusta a partir de las características del elemento en sí.

Por último, se entregan 6 acelerogramas, de los cuales se escoge uno de ellos para utilizarlo en el análisis dinámico de los modelos.

Para decidir cuál usar, se realizaron distintos modelos de suelos en PLAXIS 3D, en donde solo se modela el estrato no licuable, variando la profundidad de este. El objetivo es calibrar la respuesta superficial del sismo ajustándola a una respuesta que varié entre 0.4 y 0.5 [g], con el fin de tener una respuesta que se adecue a la normativa chilena.

El acelerograma que se utiliza (Figura 13) posee una duración de 75 segundos, y corresponde a un registro tomado en roca en la localidad de Rapel. La profundidad de la roca se definió a partir de los 50 metros para así, tener una respuesta máxima en superficie de 0.4 [g]

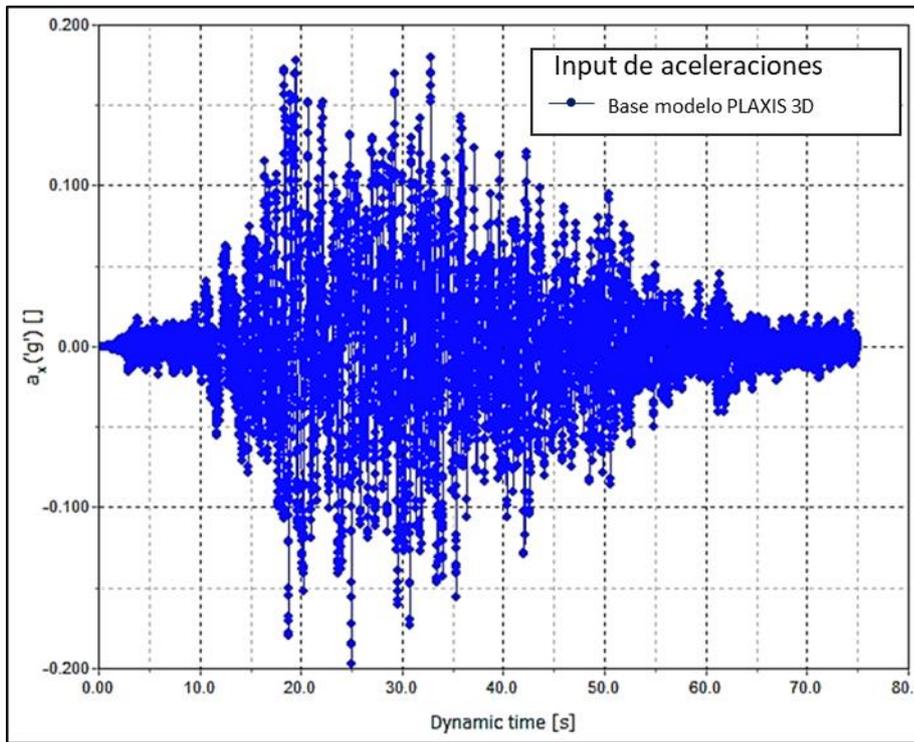


Figura 13: Input de aceleración basal a una profundidad de 50 metros (en base del modelo en PLAXIS 3D)

4. DISEÑO DE MICROPILOTES

En esta sección se detalla el diseño de micropilotes a partir de las combinaciones de carga que fueron entregadas por el ingeniero calculista y que fueron consideradas a partir de la revisión de proyectos. Para el diseño de estos elementos se utiliza un modelo de análisis matricial considerando el cabezal como un cuerpo rígido. La descripción de este modelo y las consideraciones que se realizan se encuentra adjunta en el Anexo B.1.

Se escogen 4 tipos de configuraciones de micropilotes para el análisis. Dos de ellas poseen 12 micropilotes, y el resto 16. Los modelos con la misma cantidad de micropilotes se diferencian entre sí en el ángulo de inclinación que poseen los elementos inclinados, que corresponden a 15° y 45° respectivamente. El dado de fundación en todos los casos es el mismo, donde el cuadrado que se define posee dimensiones simétricas igual a 1.6 metros. El espesor de dicho dado se definió en 1.35 metros.

Tabla 9: Tipos de configuraciones de micropilotes a utilizar

Configuración	Cantidad de micropilotes [-]	Ángulo de inclinación de sus respectivos elementos [°]
CONF A	12	15
CONF B	12	45
CONF C	16	15
CONF D	16	45

A continuación, se presentan las posiciones de los elementos en los 2 tipos de configuraciones, correspondiente a 12 y 16 micropilotes. El punto central que se aprecia en las figuras corresponde a la aplicación de la carga y las flechas indican la dirección de los micropilotes que se encuentran inclinados:

Tabla 10: Posición de los micropilotes para una configuración de 12 elementos

Micropilote	x [m]	y [m]
M-1	0.7	0.6
M-2	0.6	0.7
M-3	-0.7	0.6
M-4	-0.6	0.7
M-5	-0.7	-0.6
M-6	-0.6	-0.7
M-7	0.7	-0.6
M-8	0.6	-0.7
M-9	0.7	0.7
M-10	-0.7	0.7
M-11	-0.7	-0.7
M-12	0.7	-0.7

Tabla 11: Posición de micropilotes para una configuración de 16 elementos

Micropilote	x [m]	y [m]
M-1	0.7	0.5
M-2	0.5	0.7
M-3	-0.7	0.5
M-4	-0.5	0.7
M-5	-0.7	-0.5
M-6	-0.5	-0.7
M-7	0.7	-0.5
M-8	0.5	-0.7
M-9	0.7	0.7
M-10	-0.7	0.7
M-11	-0.7	-0.7
M-12	0.7	-0.7
M-13	0.7	0
M-14	-0.7	0
M-15	0	0.7
M-16	0	-0.7

La representación de estos elementos en vistas de elevación, para cada configuración, se muestran a continuación:

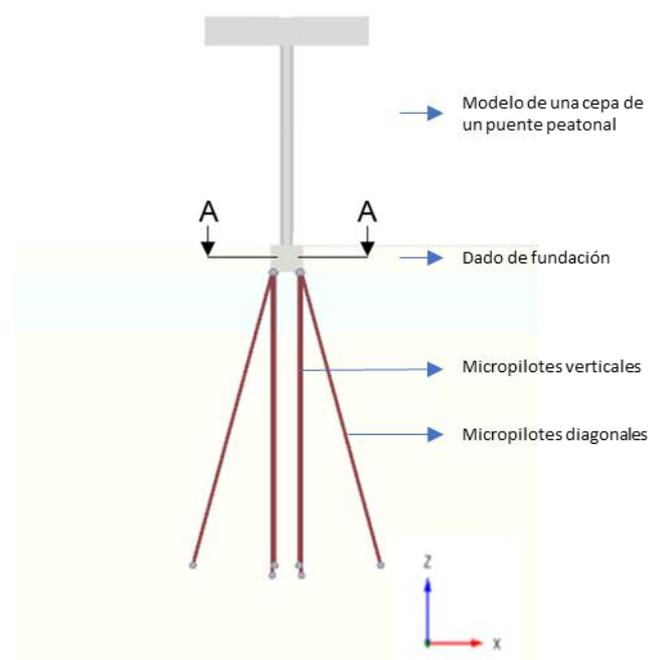


Figura 14: Vista en elevación para configuración de micropilotes A y B. Se observan micropilotes verticales y dos diagonales en la dirección del Eje X, los cuales se replican en profundidad. Además, en la figura, existen dos micropilotes que se encuentran en dirección del Eje Y (salen del plano). Escala 1:400

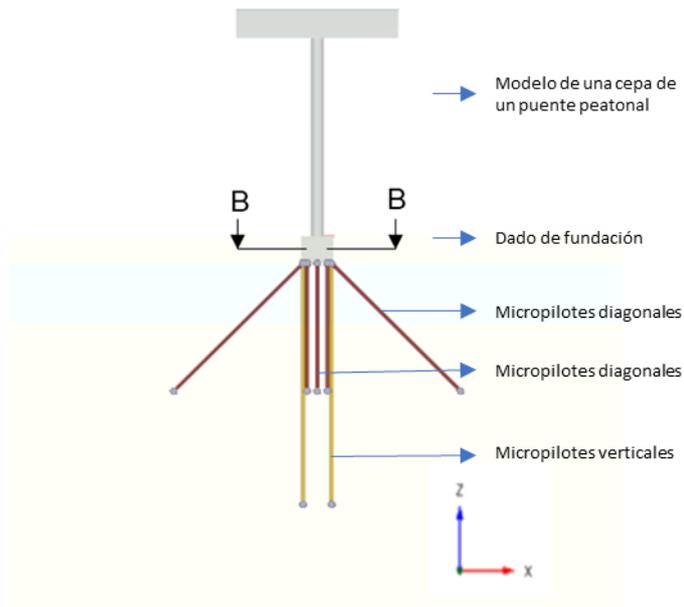


Figura 15: Vista en elevación para configuración de micropilotes C y D. Se observan micropilotes verticales y dos diagonales en la dirección del Eje X, los cuales se replican en profundidad. Además, en la figura, existen tres micropilotes que se encuentran en dirección del Eje Y (salen del plano). Escala 1:400

Se realizan cortes en las figuras anteriores en el dado de fundación, para observar la disposición de los elementos en planta. La numeración que poseen los elementos corresponde a los descritos en las Tablas 10 y 11 respectivamente.

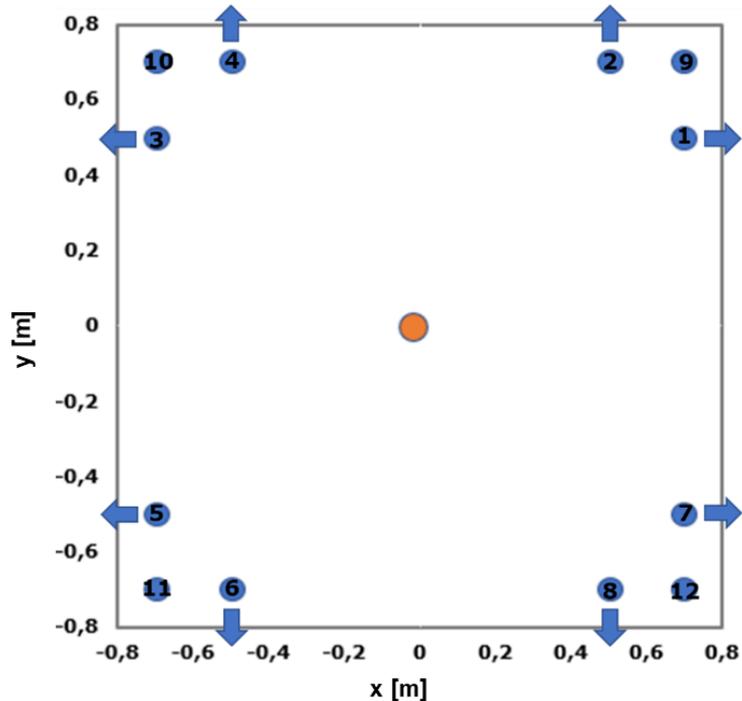


Figura 16: Corte A-A: Vista en planta dado de fundación para configuración de micropilotes A y B. Círculo naranja indica aplicación de cargas, el resto de los círculos indican los micropilotes y las flechas su dirección de inclinación. Imagen referencial.

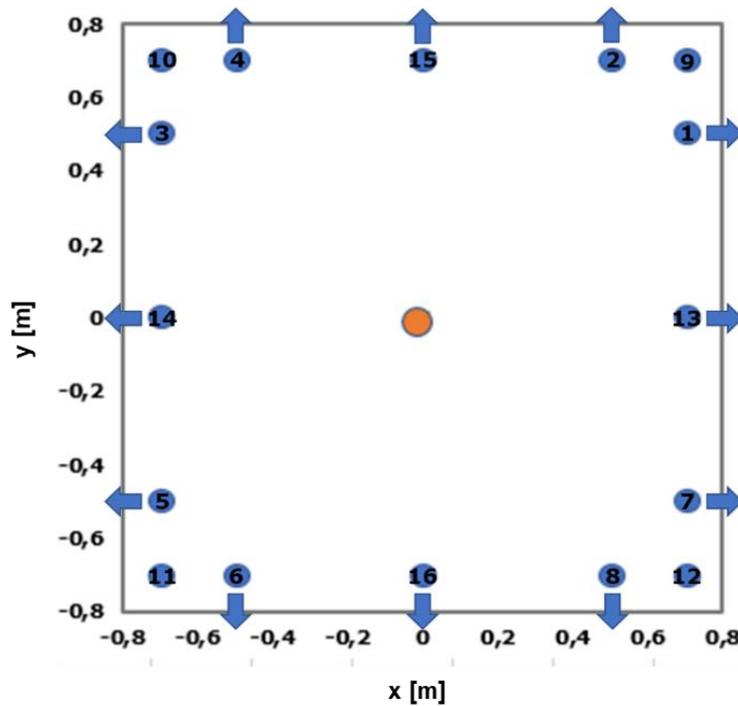


Figura 17: Corte B-B: Vista en planta dado de fundación para configuración de micropilotes C y D. Círculo naranjo indica aplicación de cargas, el resto de los círculos indican los micropilotes y las flechas su dirección de inclinación. Imagen referencial.

A partir de lo señalada en el Anexo B.1, se consiguen las solicitaciones a las que se encuentran sometido cada configuración de micropilotes. La rigidez de diseño que se utilizó corresponde a 9000 ton/m para todas las combinaciones de carga en estudio, la cual se obtuvo a partir de la revisión de proyectos.

Cabe mencionar que la rigidez real del elemento puede ser determinada a partir de ensayos de carga realizados a los micropilotes en terreno.

El proceso iterativo se realizó hasta obtener un margen de error correspondiente al 0.001%.

Tabla 12: Giros y desplazamientos finales configuración A

Giros y desplazamientos								
Δ	Comb1	Comb2	Comb3	Comb4	Comb5	Comb6	Máx	Mín
Δx (mm)	1.6	1.2	1.1	0.4	0.4	0.4	1.6	1.2
Δy (mm)	0.0	0.2	0.2	1.7	1.0	1.0	0.2	0.0
Δz (mm)	-0.6	-0.6	-0.5	-0.6	-0.6	-0.5	-0.6	-0.6
$\Delta\theta_{yz}$ (rad)	0.0	-0.9	-0.5	-1.7	-2.4	-1.4	0.0	-0.9
$\Delta\theta_{zx}$ (rad)	1.8	2.3	1.3	0.7	0.7	0.4	2.3	1.8
$\Delta\theta_{xy}$ (rad)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabla 13: Solicitación micropilotes configuración A

Solicitud [ton]								
MP	Comb1	Comb2	Comb3	Comb4	Comb5	Comb6	Máx	Mín
1	-13.93	-18.98	-13.25	-16.79	-20.47	-13.55	-13.93	-18.98
2	-14.47	-19.89	-13.02	-17.62	-18.23	-12.72	-14.47	-19.89
3	4.26	-0.14	-0.34	-10.74	-14.17	-9.25	4.26	-0.14
4	4.80	3.72	0.78	-10.24	-10.48	-8.12	4.80	3.72
5	4.26	9.09	5.31	7.13	10.57	5.61	9.09	4.26
6	4.80	10.01	5.09	7.94	8.35	4.78	10.01	4.80
7	-13.92	-9.73	-7.59	1.06	4.29	1.31	-9.73	-13.92
8	-14.47	-13.62	-8.72	0.58	0.59	0.18	-13.62	-14.47
9	-16.65	-24.96	-15.86	-20.24	-24.75	-15.86	-16.65	-24.96
10	6.63	3.56	0.81	-11.34	-15.39	-10.31	6.63	3.56
11	6.63	14.72	7.64	10.22	14.51	7.64	14.72	6.63
12	-16.64	-13.81	-9.03	1.33	5.14	2.09	-13.81	-16.64

Tabla 14: Giros y desplazamientos finales configuración B

Giros y desplazamientos								
Δ	Comb1	Comb2	Comb3	Comb4	Comb5	Comb6	Máx	Mín
Δx (mm)	2.5	2.9	1.8	0.9	0.9	0.6	0.3	-0.1
Δy (mm)	0.0	1.1	0.7	2.4	2.9	1.9	0.0	-0.2
Δz (mm)	-0.8	-0.8	-0.7	-0.8	-0.8	-0.7	-1.9	-1.9
$\Delta\theta_{yz}$ (rad)	0.0	-1.4	-0.8	-2.9	-3.7	-2.3	0.0	-0.5
$\Delta\theta_{zx}$ (rad)	3.0	3.6	2.2	1.1	1.2	0.7	1.2	0.9
$\Delta\theta_{xy}$ (rad)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabla 15: Solicitación micropilotes configuración B

Solicitud [ton]								
MP	Comb1	Comb2	Comb3	Comb4	Comb5	Comb6	Máx	Mín
1	-8.36	-13.74	-9.73	-17.13	-20.51	-13.71	-8.36	-20.51
2	-16.69	-19.99	-13.23	-12.64	-13.07	-9.25	-9.25	-19.99
3	-1.78	-6.97	-5.07	-14.97	-18.27	-12.16	-1.78	-18.27
4	6.48	7.28	3.31	-4.09	-4.10	-3.75	7.28	-4.10
5	-1.78	3.40	1.41	6.96	10.09	5.36	10.09	-1.78
6	6.48	9.58	4.88	2.52	2.73	0.94	9.58	0.94
7	-8.36	-3.43	-3.27	4.74	7.78	3.78	7.78	-8.36
8	-16.69	-17.76	-11.68	-6.08	-6.30	-4.59	-4.59	-17.76
9	-26.36	-38.50	-24.92	-32.39	-38.24	-24.93	-24.92	-38.50
10	11.89	6.58	2.40	-18.23	-23.38	-15.82	11.89	-23.38
11	11.89	23.65	13.08	17.92	23.38	13.07	23.65	11.89
12	-26.36	-21.43	-14.25	3.77	8.52	3.96	8.52	-26.36

Tabla 16: Giros y desplazamientos finales configuración C

Giros y desplazamientos								
Δ	Comb1	Comb2	Comb3	Comb4	Comb5	Comb6	Máx	Mín
Δx (mm)	-0.1	-0.7	-0.1	-0.2	-0.2	0.0	0.3	-0.1
Δy (mm)	0.0	-0.4	-0.2	0.1	-0.8	-0.3	0.0	-0.2
Δz (mm)	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-1.9	-1.9
$\Delta\theta_{yz}$ (rad)	0.0	-1.0	-0.6	-2.0	-2.7	-1.6	0.0	-0.5
$\Delta\theta_{zx}$ (rad)	2.1	2.6	1.5	0.8	0.9	0.5	1.2	0.9
$\Delta\theta_{xy}$ (rad)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabla 17: Solicitación micropilotes configuración C

Solicitud [ton]								
MP	Comb1	Comb2	Comb3	Comb4	Comb5	Comb6	Máx	Mín
1	-9.60	-14.33	-9.96	-14.20	-17.73	-11.56	-9.60	-17.73
2	-12.94	-17.13	-11.02	-13.19	-13.56	-9.43	-9.43	-17.13
3	2.30	-2.05	-1.47	-10.31	-13.63	-8.73	2.30	-13.63
4	5.61	5.57	2.21	-6.05	-6.12	-5.02	5.61	-6.12
5	2.30	6.82	3.94	6.93	10.22	5.55	10.22	2.30
6	5.61	9.69	5.05	5.84	6.12	3.44	9.69	3.44
7	-9.60	-5.38	-4.50	2.93	6.13	2.73	6.13	-9.60
8	-12.94	-13.14	-8.25	-1.21	-1.38	-0.99	-0.99	-13.14
9	-17.24	-26.85	-16.67	-21.39	-26.60	-16.67	-16.67	-26.85
10	9.65	6.15	2.56	-11.10	-15.77	-10.26	9.65	-15.77
11	9.65	19.06	10.44	13.80	18.81	10.44	19.06	9.65
12	-17.24	-13.93	-8.78	3.51	7.98	4.04	7.98	-17.24
13	-9.60	-9.86	-7.23	-5.63	-5.80	-4.42	-4.42	-9.86
14	2.30	2.38	1.24	-1.69	-1.71	-1.59	2.38	-1.71
15	-3.66	-5.78	-4.41	-9.62	-9.84	-7.22	-3.66	-9.84
16	-3.66	-1.72	-1.60	2.31	2.37	1.23	2.37	-3.66

Tabla 18: Giros y desplazamientos finales configuración D

Giros y desplazamientos								
Δ	Comb1	Comb2	Comb3	Comb4	Comb5	Comb6	Máx	Mín
Δx (mm)	2.5	2.9	1.8	0.9	1.0	0.6	0.3	-0.1
Δy (mm)	0.0	1.1	0.7	2.4	3.0	1.9	0.0	-0.2
Δz (mm)	-0.7	-0.7	-0.5	-0.7	-0.7	-0.5	-1.9	-1.9
$\Delta\theta_{yz}$ (rad)	0.0	-1.5	-0.9	-3.1	-4.0	-2.5	0.0	-0.5
$\Delta\theta_{zx}$ (rad)	3.3	3.9	2.4	1.2	1.3	0.8	1.2	0.9
$\Delta\theta_{xy}$ (rad)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabla 19: Solicitación micropilotes configuración D

MP	Solicitud [ton]						Máx	Mín
	Comb1	Comb2	Comb3	Comb4	Comb5	Comb6		
1	-6.23	-11.08	-7.81	-14.74	-17.79	-11.81	-6.23	-17.79
2	-14.61	-17.33	-11.37	-10.12	-10.46	-7.38	-7.38	-17.33
3	-1.86	-6.57	-4.72	-13.31	-16.31	-10.78	-1.86	-16.31
4	6.44	7.46	3.65	-2.36	-2.31	-2.38	7.46	-2.38
5	-1.86	2.84	1.17	6.60	9.44	5.12	9.44	-1.86
6	6.44	9.00	4.69	2.04	2.22	0.74	9.00	0.74
7	-6.23	-1.73	-1.95	5.12	7.90	4.07	7.90	-6.23
8	-14.61	-15.87	-10.35	-5.77	-5.98	-4.29	-4.29	-15.87
9	-26.64	-39.84	-25.45	-33.21	-39.54	-25.45	-25.45	-39.84
10	15.05	9.34	4.32	-17.78	-23.35	-15.52	15.05	-23.35
11	15.05	27.93	15.96	21.61	27.61	15.95	27.93	15.05
12	-26.64	-21.25	-13.81	6.18	11.42	6.03	11.42	-26.64
13	-6.23	-6.41	-4.88	-4.82	-4.95	-3.87	-3.87	-6.41
14	-1.86	-1.87	-1.77	-3.36	-3.44	-2.83	-1.77	-3.44
15	-4.09	-4.95	-3.87	-6.24	-6.39	-4.88	-3.87	-6.39
16	-4.09	-3.44	-2.83	-1.86	-1.88	-1.78	-1.78	-4.09

Se decide seleccionar micropilotes TITAN 40/16 para las configuraciones A, C y los elementos inclinados de la D. Para la configuración B y los elementos verticales de la D, se utilizan micropilotes TITAN 52/26. Los pernos son escogidos de tal forma de cumplir con las solicitudes a las que se encuentran sometidos los elementos respecto a su capacidad interna y externa.

El largo del micropilote depende de la profundidad del estrato licuable, donde el elemento debe atravesar dicha capa considerando que este no aporta resistencia al micropilote, por lo que se utilizan las mismas cargas de diseño para cada tipo de configuración, en donde solo se varía la profundidad a la cual se desarrolla.

4.1. Capacidad carga interna

La capacidad de carga interna del micropilote está dada por la falla de los materiales con los cuales se constituye el elemento. Para evaluar la capacidad de carga interna del micropilote, se utiliza el criterio de seguridad parcial presente en la norma alemana DIN 1054:2005-01, en donde se tiene que cumplir que:

$$E_d \leq R_d = \frac{R_{1,k}}{\gamma_R} \quad (31)$$

Siendo:

E_d : Solicitud de diseño mayorada de acuerdo con el caso de carga y al estado límite de diseño.

R_d : Resistencia de diseño minorada.

$R_{1,k}$: Capacidad portante del elemento de refuerzo; corresponde a la capacidad de fluencia aplicando un factor de seguridad de 1.15.

γ_R : Factor de reducción de resistencias de acuerdo con el caso de carga y al estado límite de diseño.

Las tablas para determinar el factor de seguridad se encuentran adjuntas en el Anexo B.2. Se realiza el diseño considerando al micropilote como un pilote inyectado. Además, se utiliza el caso de carga C3, el cual corresponde al caso de cargas permanentes y variables ocurrentes en estados extraordinarios (caso sísmico y otro eventual). El factor de mayoración para las solicitaciones para el estado límite de la falla estructural asociado al caso de carga 3 corresponde a 1.00, en el que se consideran solicitaciones variables (carga viva) desfavorables. Por otra parte, para el factor de reducción de resistencia, se utilizan los valores asociados a la resistencia de pilotes inyectados, específicamente el valor de resistencia del elemento metálico asociada al tercer estado de carga, cuyo valor es igual a 1.15.

De esta forma, la capacidad de carga interna queda definida según lo siguiente:

$$F_{adm} = \frac{R_{1,k}}{\gamma_R} = \frac{F_y / (1.15)}{1.00 \cdot 1.15} = \frac{F_y}{1.33} \quad (32)$$

Al considerar la capacidad de fluencia del micropilote TITAN 40/16 y del TITAN 52/26 presente en el Anexo B.1, se tiene que:

Tabla 20: Carga admisible de micropilotes según capacidad de carga interna

Tipo de barra	Carga admisible por capacidad interna [kN]
40/16-Condicion eventual	395
52/26-Condicion eventual	549

4.2. Capacidad carga externa

La capacidad de carga externa del micropilote está dada por la falla del suelo que soporta el micropilote. En esta sección se diseña la longitud del bulbo que es necesaria para transferir las cargas adecuadamente desde el micropilote al suelo.

La capacidad de carga externa del micropilote se encuentra controlada por dos posibles métodos de fallas.

1. Falla en la interfaz bulbo – suelo (caso compresión y tracción).
2. Falla por arrancamiento del suelo (sólo caso tracción).

4.2.1. Falla de adherencia de bulbo

Para este mecanismo de falla, se utiliza el método de Bustamante (1985), el cual correlaciona los resultados de los sondajes SPT (números de golpes) con la fricción unitaria última disponible para cada tipo de suelo, según el siguiente gráfico dado para arenas:

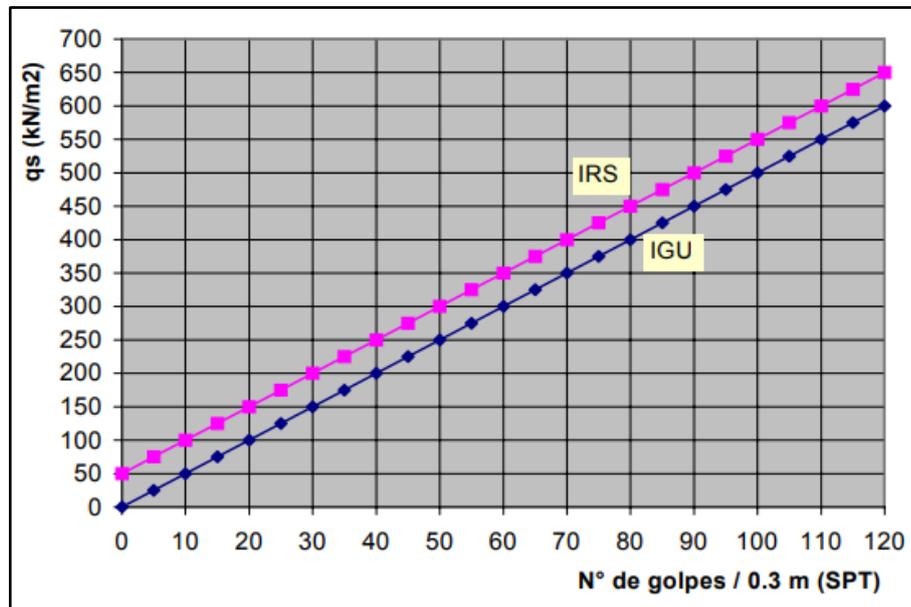


Figura 18: Correlación propuesta por Bustamante para la fricción unitaria en arenas y gravas. Bustamante 1985

Para obtener la longitud necesaria, se utilizará la siguiente fórmula:

$$F_{adm} \leq \frac{1}{FS} \cdot \pi \cdot \phi_b \cdot (L_v \cdot q_s) \quad (33)$$

Donde:

F_{adm} : Carga admisible por fricción del micropilote [kN].

FS : Coeficiente de seguridad para la fricción (DIN 4128) correspondiente a 1.75

ϕ_b : Diámetro promedio del bulbo inyectado (1.5 veces el diámetro de la broca de perforación para arenas) [m].

L_v : Longitud de bulbo del micropilote según diseño [m].

q_s : Fricción unitaria última en el fuste del micropilote (contacto bulbo-suelo) [kN/m²].

Al conocer el número de golpes dado por el ensayo SPT, los cuales corresponden a 13 y 36 para el estrato licuable y no licuable, se determina que la fricción unitaria para el suelo no licuables es igual a 110 [kPa] y 240 [kPa] respectivamente. No obstante, se considera que el estrato licuable no aporta resistencia debido a su comportamiento ante un evento sísmico, por lo que se consideran longitudes adicionales de manera que el micropilote desarrolle su resistencia en el estrato competente.

El diámetro de perforación queda definido según el tipo de micropilote a utilizar. Los diámetros de perforación quedan definidos a continuación:

Tabla 21: Diámetro de perforación de micropilotes

Tipo de barra	40/16	52/26
Diámetro de perforación [mm]	90	115
Factor de mayoración de bulbo	1.5	1.5
Diámetro de diseño del bulbo [mm]	135	172

Para determinar el largo del bulbo, se consideran las solicitaciones a las que se encuentran sometidas los micropilotes, las que se encuentran indicadas en la Tabla 13. Los valores de capacidad admisible por falla de adherencia de bulbo para las 4 configuraciones se encuentran adjunta en el Anexo B.3.

Por último, se considera un largo L_0 , que sea múltiplo de 1.5, con el fin de considerar el largo comercial necesario para cumplir con la resistencia de los micropilotes.

4.2.2. Falla por arrancamiento del suelo

Para este caso, se debe cumplir que:

$$Q_{adm} = \frac{W'_s}{FS} > T_{sol} \quad (34)$$

Donde:

T_{sol} : Solicitación admisible en el micropilote traducida a una carga de tracción [kN].

W'_s : Componente del peso del suelo que es arrancada por el micropilote que depende de la interacción considerada entre micropilotes [kN].

FS : Factor de seguridad (F.S.>1.35).

La componente del peso del suelo varía dependiendo de la interacción que pueda existir entre los ejes de los elementos. Se considera que los micropilotes inclinados se ejecutan con una inclinación respecto al eje vertical dado por β . De esta forma, la falla queda definida por el volumen de suelo movilizado:

$$V_{s1} = 0.271 \cdot L_v^3 \cdot \tan^2(\phi). \quad (35)$$

Por lo que el peso del suelo desplazado es:

$$W_{s1} = \gamma' \cdot V_{s1} \cdot \cos(\beta). \quad (36)$$

Finalmente, el peso de reacción para el arrancamiento de un micropilote, para el caso en que no existe interacción entre micropilotes, es igual a:

$$W'_s = 0,271 * \gamma' * Lv^3 * \tan^2(\phi) \cdot \cos(\beta) \quad (37)$$

Donde:

L_v : Largo del bulbo [m].

γ' : Peso boyante del suelo [$\frac{kN}{m^3}$].

ϕ : Ángulo de fricción del suelo [$^\circ$].

Utilizando las ecuaciones indicadas anteriormente, y las propiedades de resistencia del estrato competente, las que corresponden a $\phi = 37^\circ$ y $\gamma' = 10kN/m^3$ para las mismas dimensiones de micropilotes dadas por la falla por adherencia, se obtienen los valores indicados en el Anexo B.3

4.2.3. Falla por pandeo del elemento

La diferencia de rigideces entre la arena que subyace al estrato licuable y esta última, generan la posibilidad de que exista un efecto de pandeo al momento de que el estrato no competente licue. Para ello, se utiliza lo propuesto por Cadden (2002) y lo indicado en el capítulo 2.3 (Figuras 10 y 11)

Para el análisis, se debe considerar un módulo de reacción lateral del terreno característico para una arena licuable. Por ello, es que se utiliza lo propuesto por el Instituto de Arquitectura de Japón (2001) y la Asociación de carreteras de Japón (1997), quienes adoptan las siguientes formulaciones:

$$k_{hn} = 80 \cdot E_0 \cdot D^{-0.75} \quad (38)$$

$$E_0 = 0.7 \cdot N_{SPT} \quad (39)$$

En el cual, E_0 es el módulo de deformación en MN/m^2 , N_{SPT} corresponde al número de golpes del SPT, D el diámetro de la pila en centímetros y k_{hn} al coeficiente de balasto, en MN/m^3 .

Debido a que este último modulo no es constante y generalmente cambia con la profundidad, es que se decide relacionarlo con el valor del N_{SPT} , con el fin de atender la variación arbitraria de k_{hn} en los depósitos de suelos.

Sin embargo, lo mencionado anteriormente aplica para suelos no licuables, ya que para suelos que licuan, este módulo se degrada a medida que la licuefacción se comienza a desarrollar.

Ishihara (1997) y Tokimatsu (1999) proponen un método para considerar dicha degradación. Este consiste en utilizar un factor que reduzca el módulo de balasto original denominado S_f que varía entre 0.001 y 0.01 (dependiendo del caso). Este queda representado como:

$$k_h = k_{hn} \cdot S_f \quad (40)$$

Para el cálculo en la condición licuable, se aplica la ecuación (39) en (38) y se determina k_{hn} . Luego, se utiliza la ecuación (40) y se obtiene k_h , el cual, al realizar el proceso inverso, se determina el valor de E_0 para la

condición licuable, obteniendo así un valor de 91 kN/m², lo que es equivalente a 0.014 ksi.

El módulo de balasto correspondiente para un micropilote TITAN 40/16 Y TITAN 52/26 corresponde a 2574 kN/m³ y 2114 kN/m³ respectivamente.

Por otra parte, se utiliza un pile factor del micropilote TITAN 40/16 igual a 3.2 in²/kip y para el micropilote TITAN 52/26 igual a 2.92 in²/kip.

Finalmente, se ingresan estos datos en el ábaco de diseño propuesto por Cadden (2002), se tiene lo indicado a continuación:

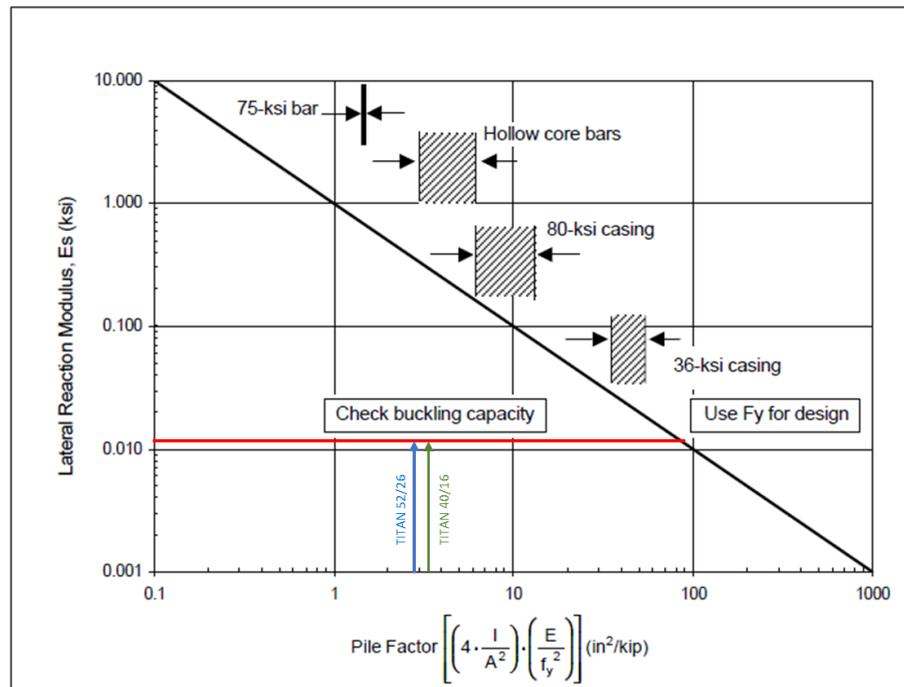


Figura 19: Evaluación de capacidad de pandeo. Cadden 2002

De la figura anterior, se observa que se debe chequear la capacidad de pandeo de los elementos al momento que el suelo comience a licuar.

Para evaluar la capacidad del elemento a pandear, se considera lo propuesto por Davisson y Robinson (1965) descrito en el capítulo 2.3, quienes consideran un largo efectivo de empotramiento para evaluar la condición de pandeo. Por tanto, al utilizar la ecuación (28), se tiene que para un micropilote TITAN 40/16 y TITAN 52/26 se tienen largos de empotramientos equivalentes igual a 83 y 92 centímetros.

Con estos últimos valores, y al aplicar la ecuación (29), se tiene que las cargas críticas de pandeo corresponden a 750 kN y 842 kN respectivamente.

4.3 Módulo de elasticidad equivalente para micropilotes

El módulo de Young equivalente para una sección de micropilote se define según la ecuación (30), en donde se considera las rigidices de los materiales con las que se encuentra compuesto y las áreas que abarcan.

Para la lechada se utiliza un módulo de elasticidad igual a 34000000 kN/m². Para el elemento de acero, se considera una rigidez axial ($E \cdot A$) igual a 167000 kN para el micropilote TITAN 40/16, y de 231.000 kN para el TITAN 52/26. Las áreas consideradas para el cálculo del módulo equivalente se detallan a continuación:

Tabla 22: Parámetros para determinar el módulo de Young equivalente

Tipo de barra	40/16	52/26
Diámetro nominal exterior [m]	0.04	0.052
Diámetro nominal interior [m]	0.016	0.026
Diámetro del bulbo [m]	0.135	0.172
Área efectiva de acero [m ²]	0.0009	0.00125
Área de cemento [m ²]	0.0134	0.0221
Área total [m ²]	0.0143	0.0234
Módulo de Young equivalente [kN/m ²]	43529211	42065722

5. DEFINICIÓN DE MODELOS EN PLAXIS 3D

Se definen un total de 12 modelos de micropilotes y un modelo de pilote, con el fin de realizar una comparación entre ambos métodos. Para cada configuración de micropilotes, se evaluó su comportamiento ante 3 distintos espesores del estrato licuable, los que corresponden a 3, 5 y 8 metros.

El modelo posee un largo en el sentido de análisis de 200 metros. En el eje donde no se aplica el sismo, se tiene un ancho de 30 y 40 metros según el caso que corresponda.

Se desea modelar la cepa de un puente peatonal. Dicho modelo posee un periodo fundamental similar a un modelo simple de una pasarela, lo que se asemeja a un marco con tres apoyos.

A partir de esto último, se define una estructura que posee una altura de 9.85 metros, compuesta por una columna de hormigón armado cuyo radio es 0.32 metros. En la parte superior de la estructura, se tiene un rectángulo de hormigón armado de largo 8 metros, centrada en la columna, y cuya profundidad y alto son de 1.4 metros. El periodo fundamental de la estructura corresponde aproximadamente a 1.4 segundos.

El dado de fundación se desarrolla en el estrato superior competente, y su base se encuentra apoyada en el estrato licuable. Para determinar el periodo se consideraron las siguientes características de diseño según la norma chilena NCh433, y adicionado lo propuesto por DS61.

La estructura se encuentra en el centro del modelo con el fin de evitar que existan distorsiones debido a la influencia de las condiciones de borde del problema. Las condiciones de borde en el Eje Y se definieron en "None", lo que significa que se aplican las fijaciones estándar a este límite. En cambio, en la dirección del sismo, se eligió la condición de borde viscosa, la cual utiliza amortiguadores en lugar de aplicar restricciones en una determinada dirección. Dicho amortiguador asegura que se absorba una parte de energía de las ondas que llegan, sin producir un efecto de rebote, sin embargo, provoca un movimiento en el borde.

Cabe destacar que, durante la calibración de este aspecto, se generaron modelos en donde existían condiciones viscosas en dirección de ambos ejes. Esto desencadenaba asentamientos de hasta 20 cm en ellos, para un estrato licuable de 3 metros, debido a que no solo se deformaba el estrato licuable, sino que también comenzaba a desplazarse el suelo competente. Incluso, al instalar la estructura con su sistema de fundación respectivo, las deformaciones no cambiaban.

Debido a estos problemas durante la fase de prueba, es que se tienen las restricciones y dimensiones antes señaladas.

Los modelos constan de tres fases constructivas: Una fase inicial en donde existe una generación de esfuerzos iniciales en el modelo debido a la influencia del peso del material que compone el estrato de suelo, y de su estado de carga (pre-consolidado o normalmente consolidado). Este estado de esfuerzo es usualmente caracterizado por el esfuerzo efectivo vertical inicial ($\sigma'_{v,0}$) y el esfuerzo efectivo horizontal inicial ($\sigma'_{h,0}$). Este último se encuentra relacionado con el esfuerzo efectivo vertical mediante el coeficiente de presión lateral del suelo K_0 ($\sigma'_{h,0} = K_0 \cdot \sigma'_{v,0}$).

Luego de la fase inicial, existe una segunda fase en donde se coloca la estructura y su respectivo sistema de fundación.

Finalmente, la última fase corresponde a la dinámica, en donde se aplica el sismo que fue calibrado anteriormente en la base del modelo. La profundidad en la que se aplica la carga dinámica corresponde a 50 metros.

El esquema en profundidad de los modelos para los diferentes espesores de estrato licuable se muestra a continuación:

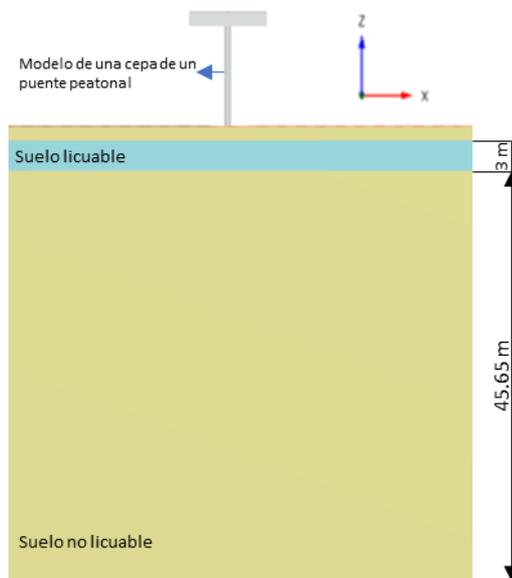


Figura 20: Modelo con estrato de 3 metros licuables. Unidades en metro. Escala 1:800

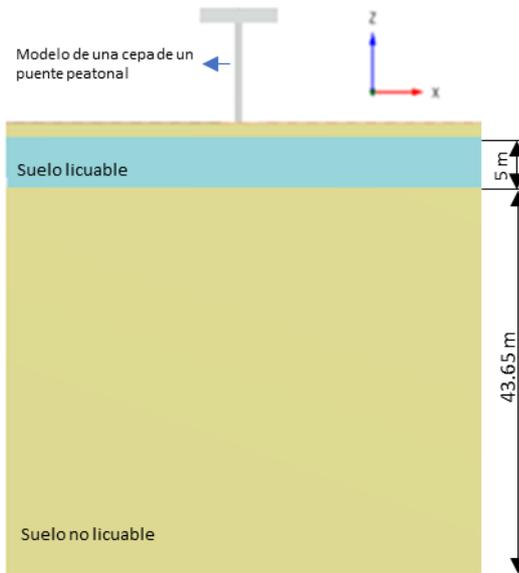


Figura 21: Modelo con estrato de 5 metros licuable. Unidades en metro. Escala 1:800

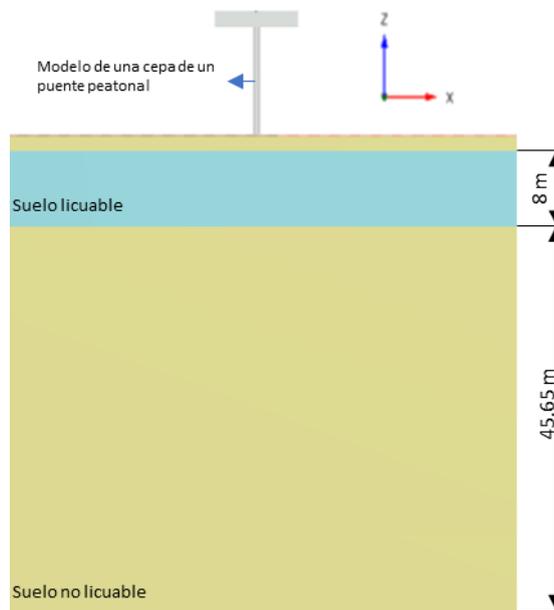


Figura 22: Modelo con estrato de 8 metros licuales. Unidades en metro. Escala 1:800

6. RESULTADOS

Los siguientes gráficos presentan las respuestas de aceleraciones horizontales que se generan en superficie para cada profundidad de estrato licuable.

Los puntos corresponden a la aceleración presentada en la Figura 13 (Base modelo), a la base de la estructura modelada, la que se encuentra fundada con micropilotes (Base estructura), y a zonas alrededor de dicha estructura, en donde la influencia de los micropilotes es casi nula (a una distancia de 15 metros respecto a la base de la estructura).

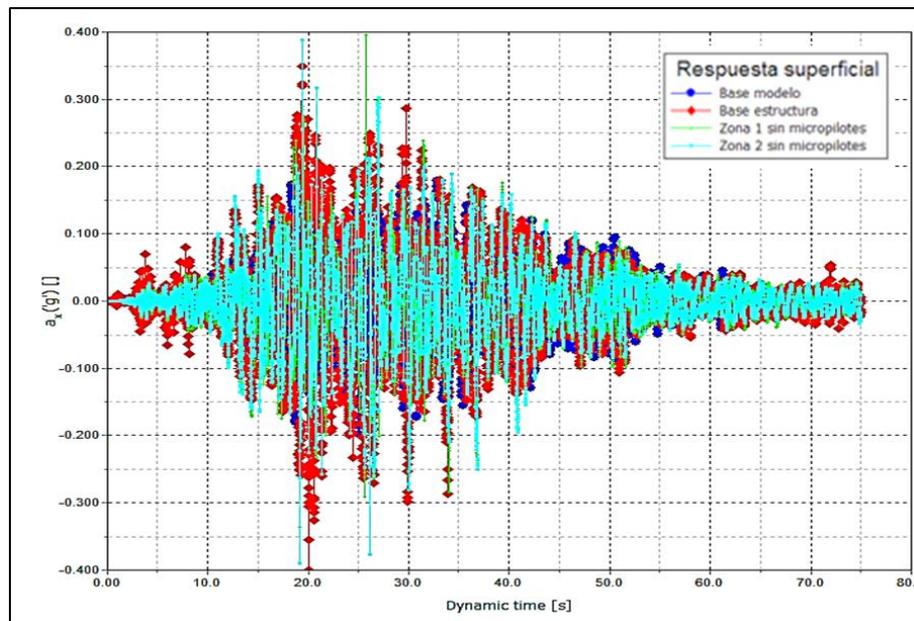


Figura 23: Respuesta superficial de aceleraciones horizontales para configuración con estrato licuable de 3 metros

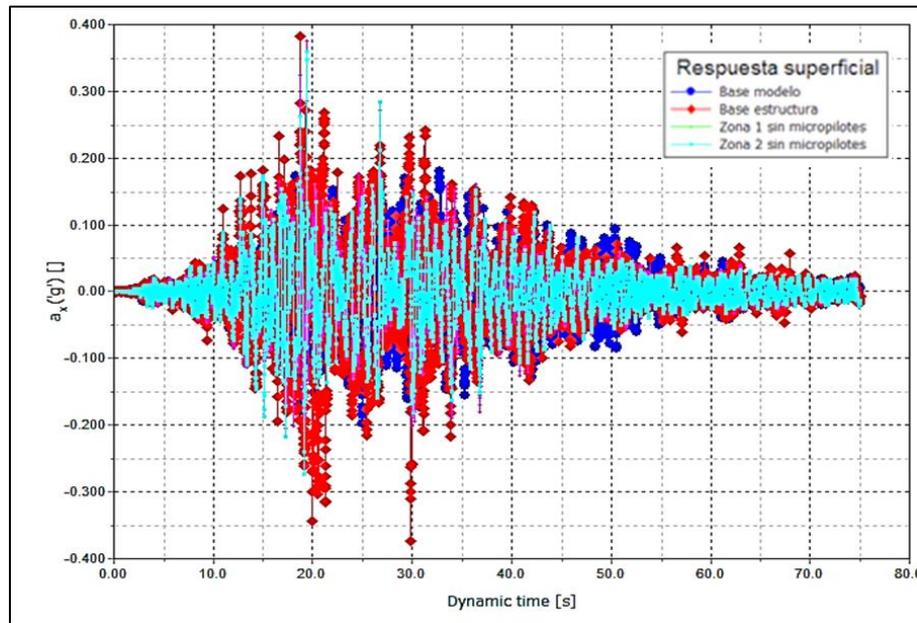


Figura 24: Respuesta superficial de aceleraciones horizontales para configuración con estrato licuable de 5 metros

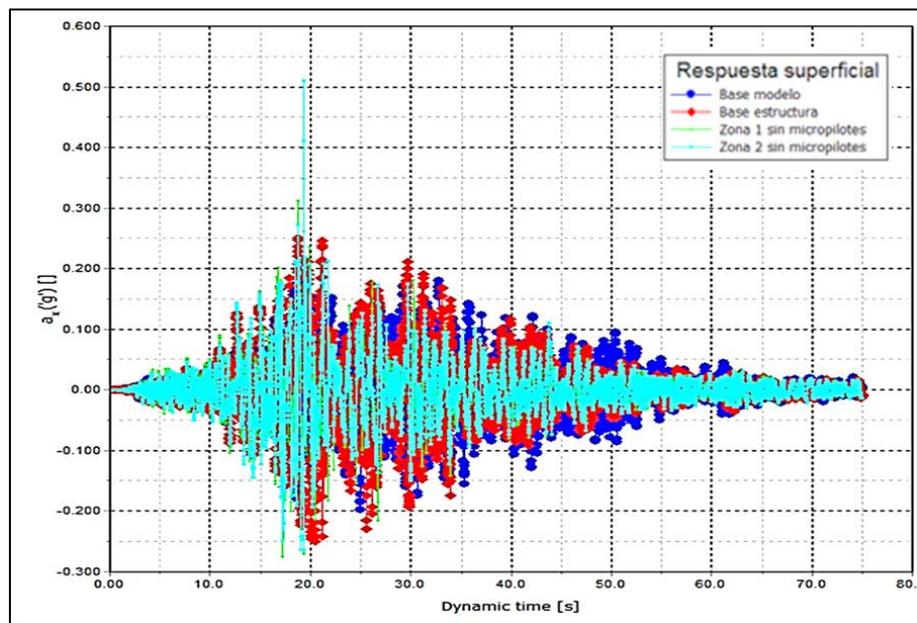


Figura 25: Respuesta superficial de aceleraciones horizontales para configuración con estrato licuable de 8 metros

Las respuestas de cada configuración difieren entre si debido a la profundidad del estrato licuable, lo que genera una mayor o menor amplificación de las ondas sísmicas dependiendo del caso.

Se observa que, para las tres configuraciones, existe un peak de aceleraciones no superior de los 0.4 [g] en la base de la estructura, excepto para la configuración cuyo estrato licuable es de 8 metros, la que presenta un peak no superior a 0.3 [g].

En cambio, en zonas que se encuentran en un radio de 15 metros de la estructura, se observa un peak que resulta igual a 0.4 [g], 0.4 [g] y 0.5 [g] para las capas de estrato licuable de 3, 5 y 8 metros respectivamente.

Esto último indica que el sistema de fundación con micropilotes redujo las aceleraciones en la zona de la estructura.

Con respecto a la Figura 26 y 27, se observa que la disposición de micropilotes cuyos elementos inclinados se encuentran en 45° , la respuesta de aceleraciones entrega peaks que son 0.1 [g] mayor a la respuesta en donde los elementos se encuentran inclinados en 15° . Este comportamiento se aprecia tanto como para 12 y 16 micropilotes. Cabe destacar que estos puntos se ubican en la base de la estructura.

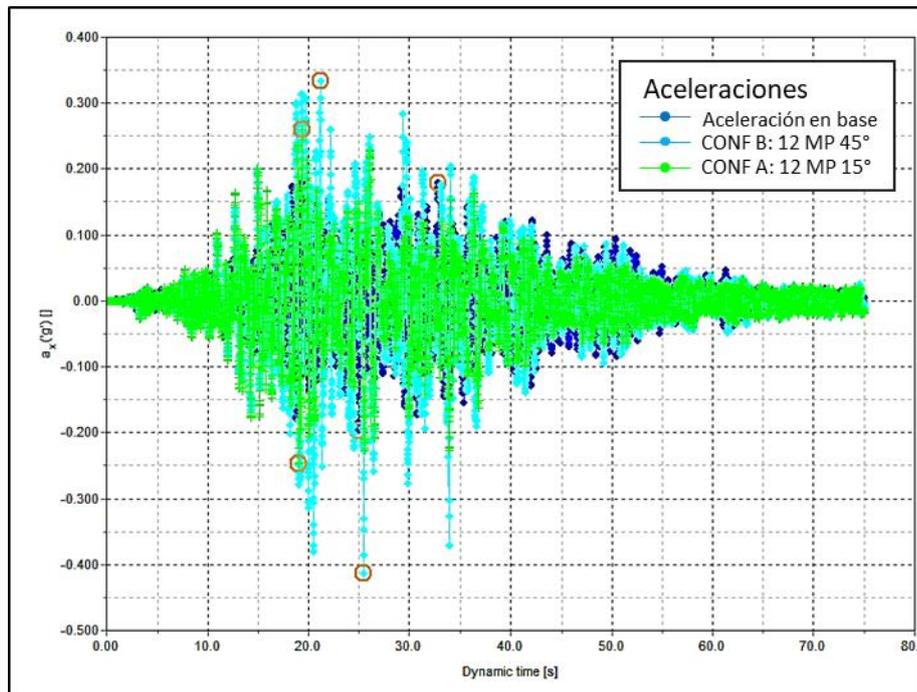


Figura 26: Respuesta de aceleraciones horizontales en superficie para estrato de 3 metros licuables con 12 micropilotes

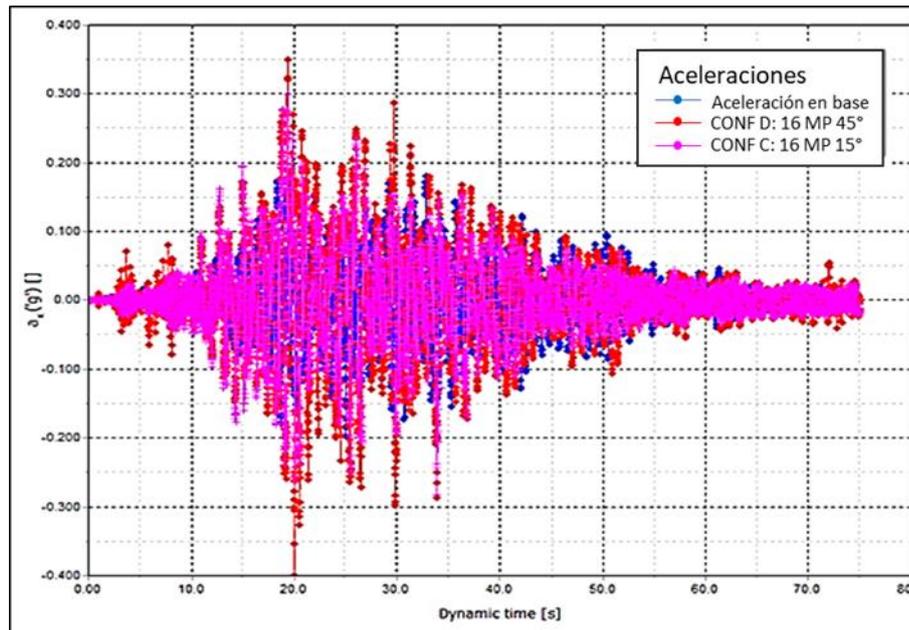


Figura 27: Respuesta de aceleraciones horizontales en superficie para estrato de 3 metros licuables con 16 micropilotes

De igual forma, al estudiar este comportamiento en el resto de los modelos cuyo estrato licuable difiere de 3 metros, se aprecia un comportamiento similar al descrito anteriormente. No obstante, la diferencia de peaks en estos modelos alcanzan valores de 0.2 [g]

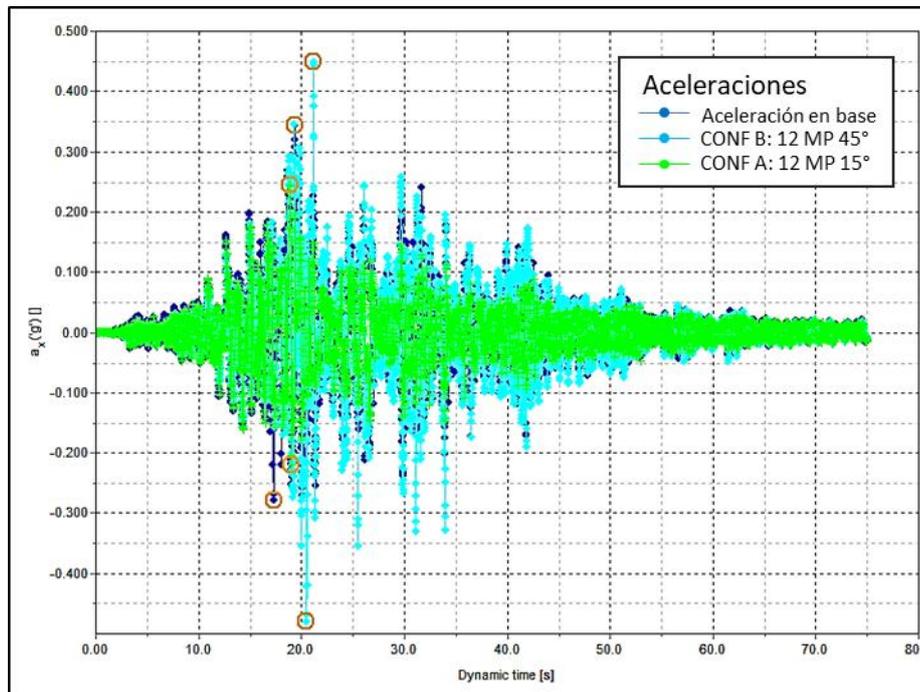


Figura 28: Respuesta de aceleraciones horizontales en superficie para estrato de 5 metros licuables con 12 micropilotes

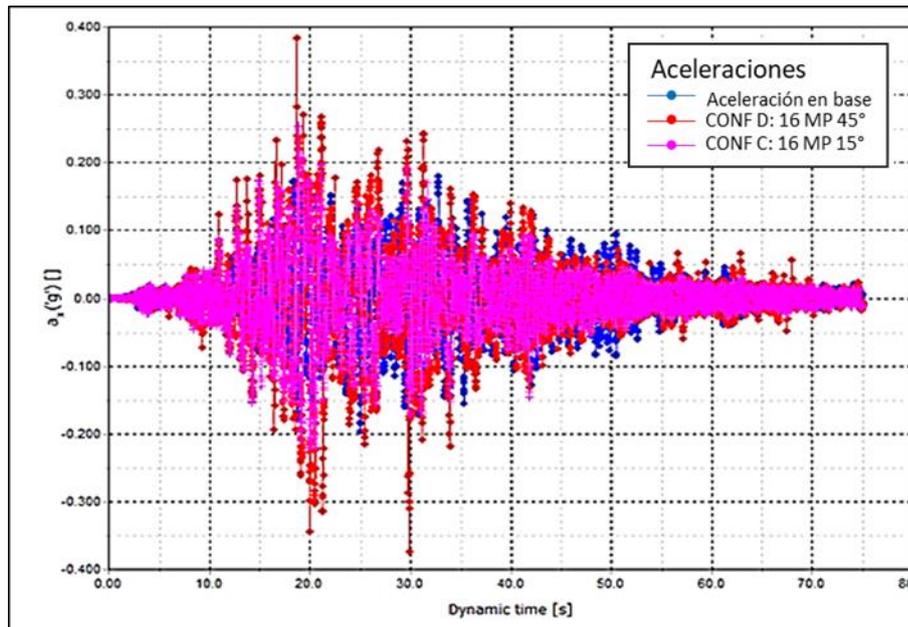


Figura 29: Respuesta de aceleraciones horizontales en superficie para estrato de 5 metros licuables con 16 micropilotes

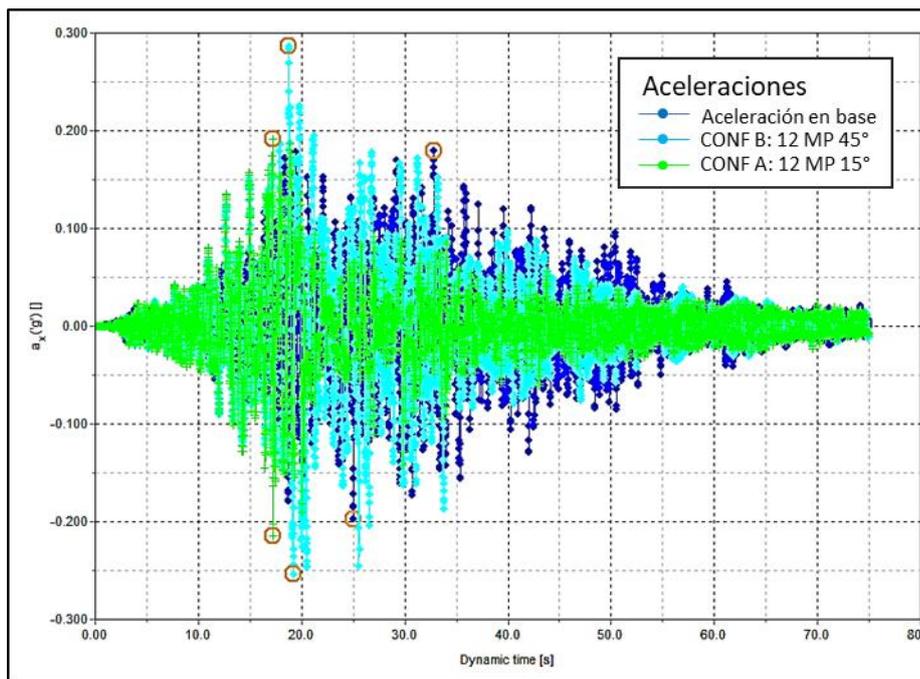


Figura 30: Respuesta de aceleraciones horizontales en superficie para estrato de 8 metros licuables con 12 micropilotes

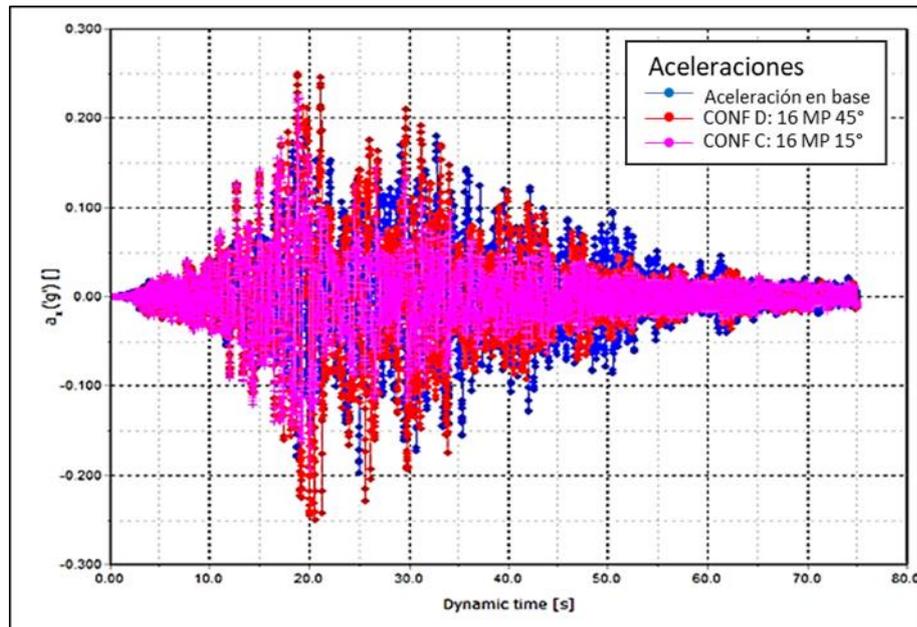


Figura 31: Respuesta de aceleraciones horizontales en superficie para estrato de 8 metros licuables con 16 micropilotes

Respecto a la licuefacción, se observa este comportamiento mediante el exceso de presiones de poros en el tiempo, debido a que el software no otorga el número de ciclos a los que fue sometido el estrato debido a la carga sísmica.

En primer lugar, y con el fin de verificar de que efectivamente el estrato licuable licuó durante la carga sísmica, se utiliza el índice de exceso de presión de poros $r_{u,t}$, presentado en la ecuación (22).

A a continuación, se muestran los esquemas asociados a la condición final de este parámetro, respecto a cada profundidad del estrato licuable.

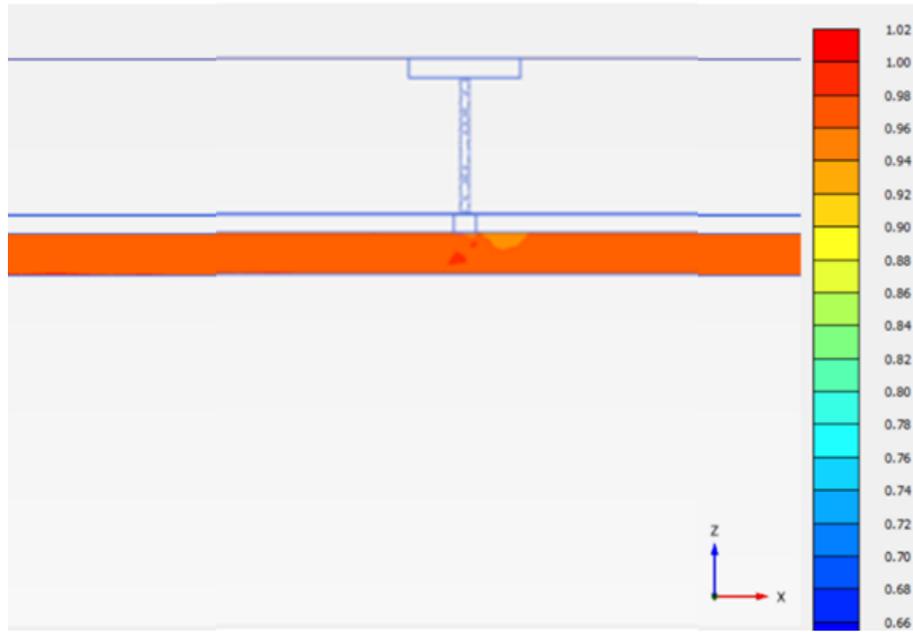


Figura 32: Índice de exceso de presión de poros para estrato licuable de 3 metros, con sistema de micropilotes incorporado. Imagen representativa

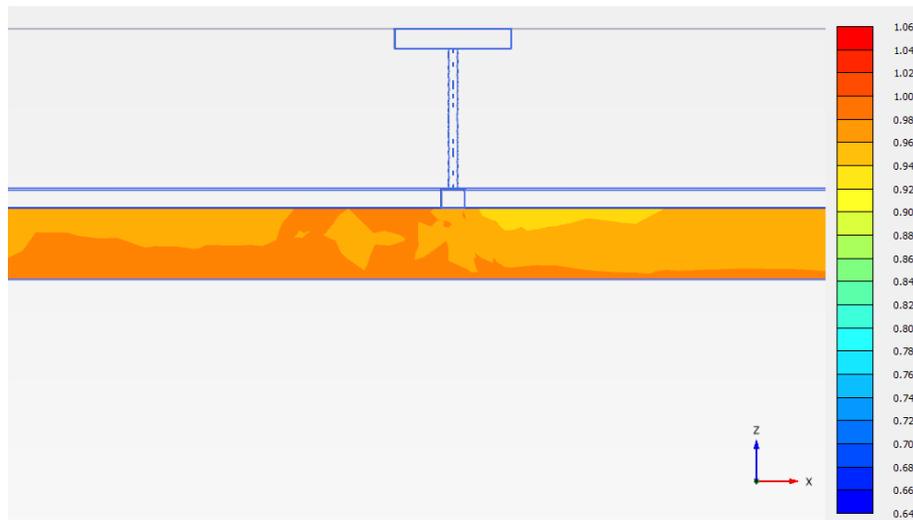


Figura 33: Índice de exceso de presión de poros para estrato licuable de 5 metros, con sistema de micropilotes incorporado. Imagen representativa

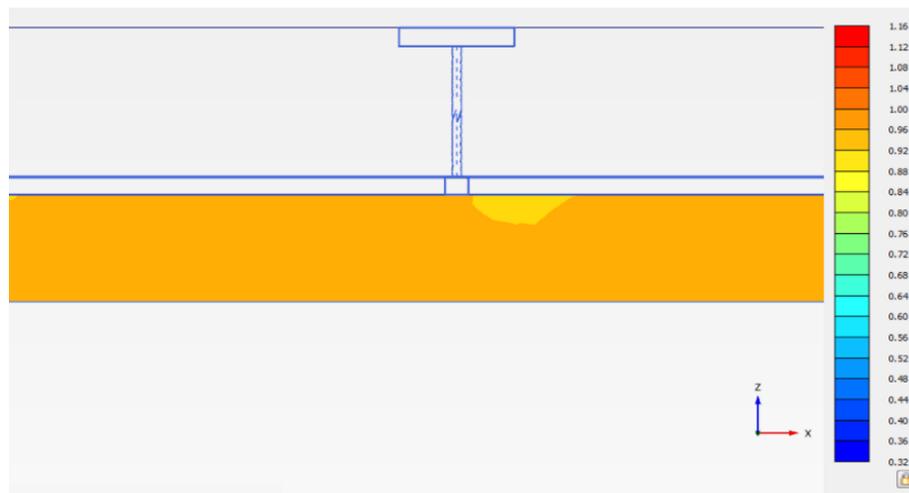


Figura 34: Índice de exceso de presión de poros para estrato licuable de 8 metros, con sistema de micropilotes incorporado. Imagen representativa

Los resultados obtenidos de la modelación numérica, y representados en la Figura 32, 33 y 34, muestran que efectivamente el estrato licuó en los tres casos, dado que el índice sigue es superior a 0.9, por lo que al considerar lo mencionado por Beaty & Perlea (2011), se concluye que la capa de suelo ha licuado.

También, en puntos alrededores de la estructura, se observa que se genera un mayor confinamiento y resistencia al esfuerzo cortante a medida que se aumenta la inclinación y el número de elementos. Esto se puede apreciar al graficar el tiempo v/s el exceso de presión de poros, ya que es necesario alcanzar mayores valores de presiones de poros para que el suelo licue, lo que implica que el confinamiento en dicha zona aumento debido a los micropilotes. Sin embargo, se debe destacar que esto no es suficiente para impedir que se desarrolle la licuefacción.

A continuación, se presentan los gráficos de exceso de presiones de poros para los distintos casos de estrato licuables:

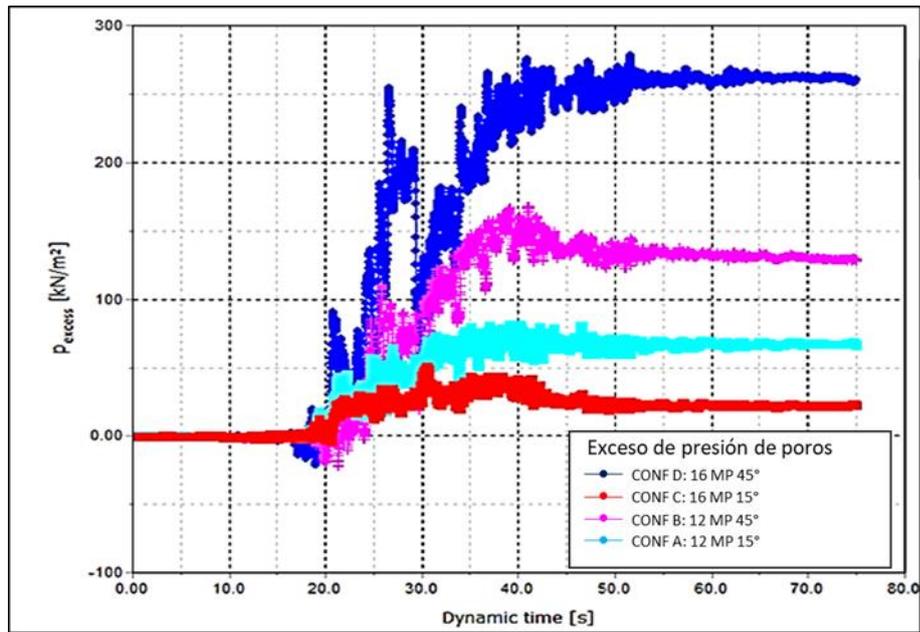


Figura 35: Exceso de presiones de poros vs tiempo para estrato licuable de 3 metros, en un radio de 5 metros del centro del dado de fundación de la estructura, en la dirección de aplicación del sismo.

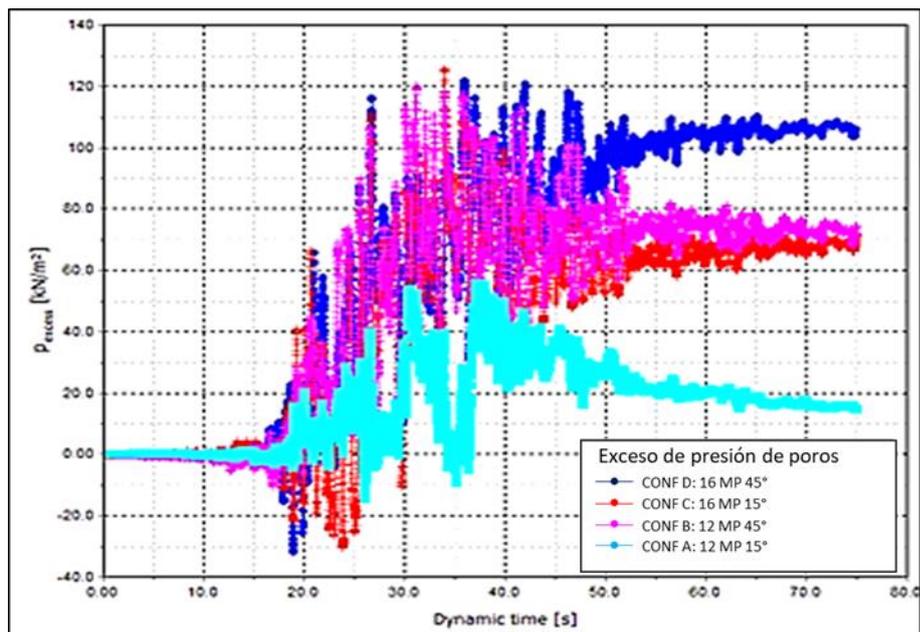


Figura 36: Exceso de presiones de poros vs tiempo para estrato licuable de 5 metros, en un radio de 5 metros del centro del dado de fundación de la estructura, en la dirección de aplicación del sismo.

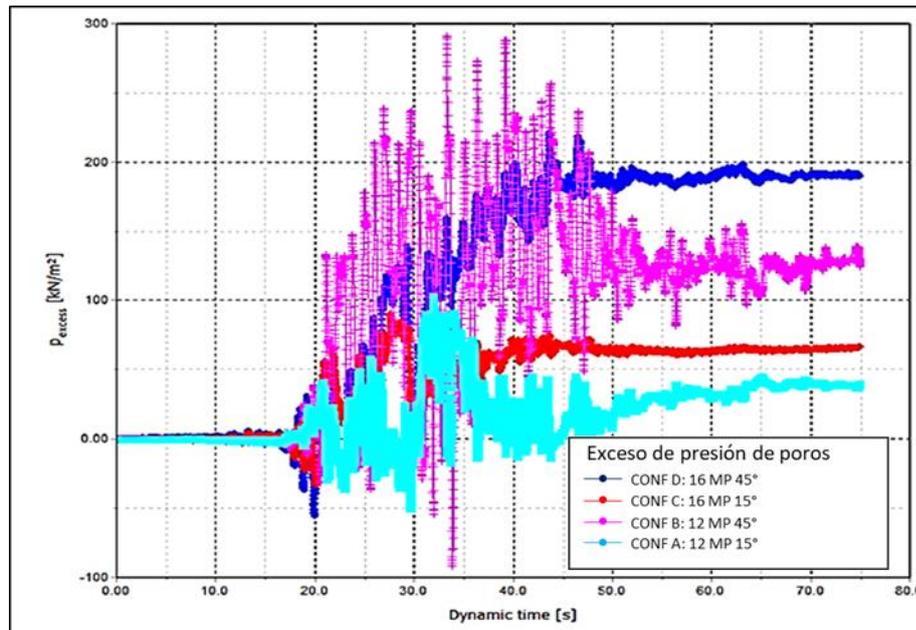


Figura 37: Exceso de presiones de poros vs tiempo para estrato licuable de 8 metros, en un radio de 5 metros del centro del dado de fundación de la estructura, en la dirección de aplicación del sismo.

En estos dos últimos casos, se observa que para la composición de 12 micropilotes con sus elementos inclinados en 45° (configuración B), la fase cíclica difiere respecto al resto debido a la amplitud de los ciclos que presenta. Aun así, se visualiza que logra estabilizarse en un momento.

Ahora bien, respecto a los desplazamientos laterales, se observa que, gráficamente, los mayores desplazamientos se generan en la fase cíclica o cuando las presiones de poro comienzan a aumentar. Además, existen casos en donde se nota una deformación permanente una vez que las presiones de poros han reducido a cero los esfuerzos efectivos del suelo. Sin embargo, el desplazamiento residual que se genera en estos modelos en la mayoría de los casos es bastante similar, no superando los 3 cm de movimiento para todos los casos. De hecho, el comportamiento para los 3 casos es similar respecto al movimiento y la forma de los gráficos, en donde se diferencian en los valores peak que alcanza cada desplazamiento, tal y como se observan en las figuras presentes a continuación:

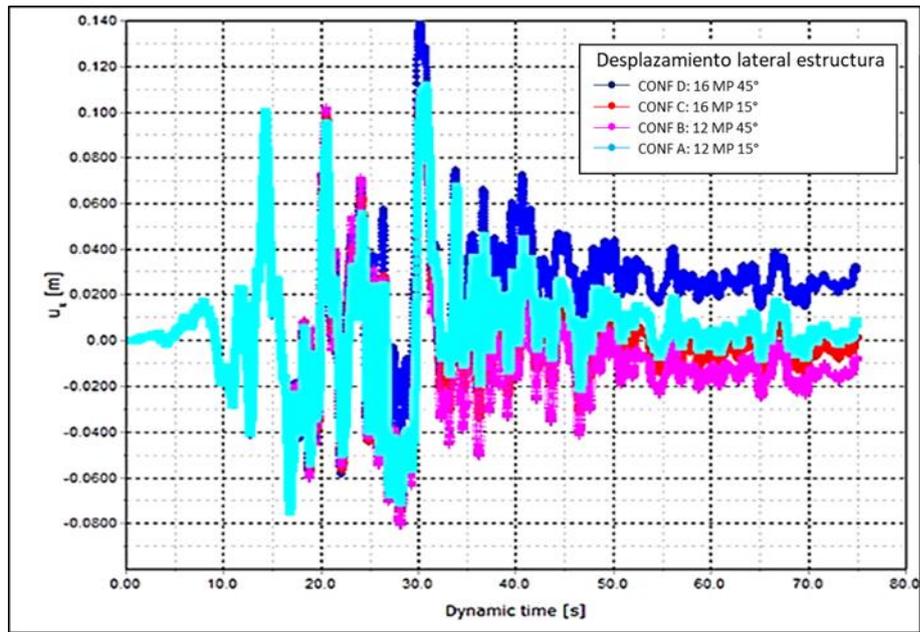


Figura 38: Desplazamiento lateral para estrato licuable de 3 metros

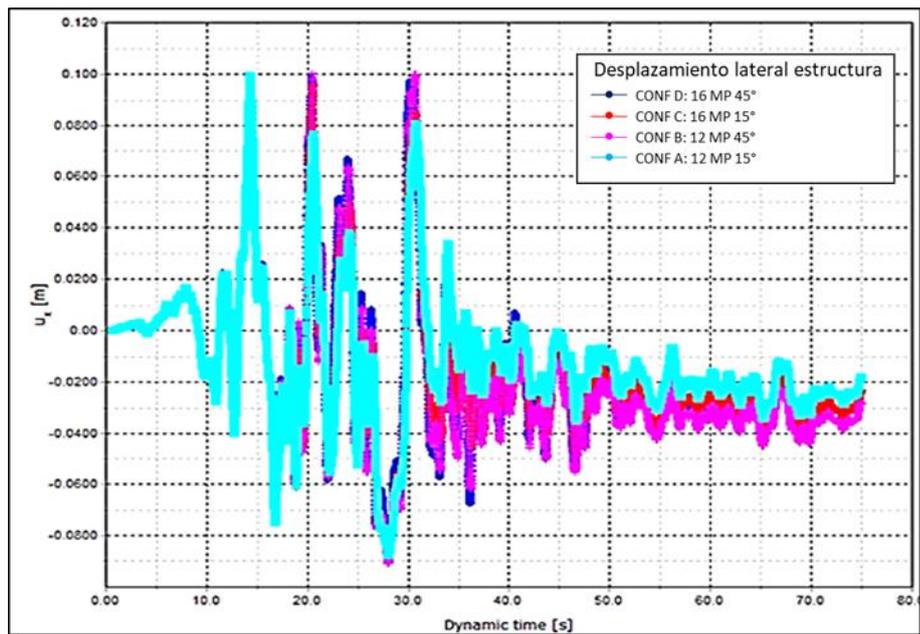


Figura 39: Desplazamiento lateral para estrato licuable de 5 metros

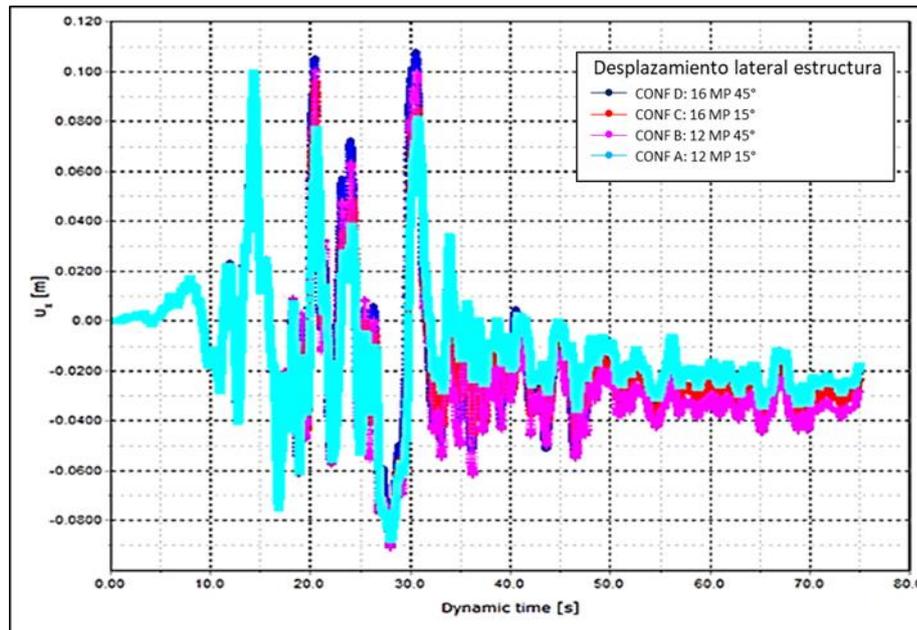


Figura 40: Desplazamiento lateral para estrato licuable de 8 metros

Un aspecto por destacar de las Figuras 38, 39 y 40, es que, durante la fase cíclica, se alcanzan desplazamientos que logran los 15 centímetros para un estrato de 3 metros licuables, siendo 5 cm menor al peak alcanzado en el resto de los casos.

Por otra parte, se debe considerar el desplazamiento vertical o el asentamiento en la estructura. Este aspecto es relevante al momento de evaluar el comportamiento de la estructura, ya que se desea mantener la funcionalidad de esta. Los asentamientos que se generan debido al evento sísmico se muestran a continuación.

Respecto al resto de los modelos con distinta profundidad de estrato licuable, se tiene que mientras menor sea el ángulo de inclinación de los micropilotes, el asentamiento de la estructura disminuye. Sin embargo, en los alrededores (en un radio de 5 metros aproximadamente), se tiene un aumento del asentamiento del orden de 2 a 4 milímetros (dependiendo del caso) al disminuir el ángulo de inclinación.

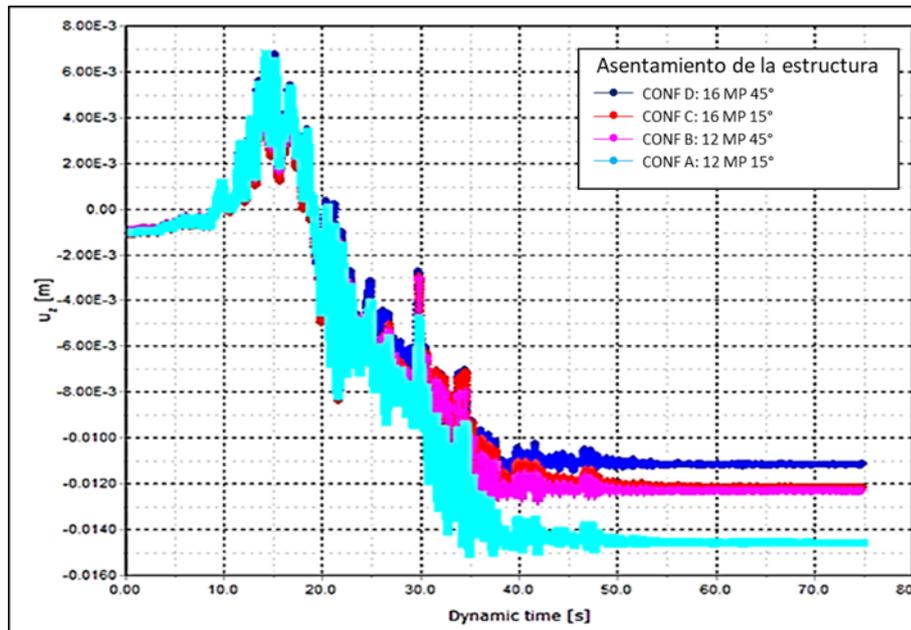


Figura 41: Asentamiento de la estructura para distintas configuraciones para un estrato licuable de 3 metros

La figura anterior presenta un comportamiento esperado al aumentar la cantidad de micropilotes y el ángulo de inclinación de estos. No obstante, para un estrato licuable de 5 metros, se observa que a medida que disminuye el ángulo de inclinación para la misma cantidad de micropilotes, el comportamiento mejora en la zona, presentándose una diferencia de alrededor de 1 mm entre cada configuración, lo cual es prácticamente insignificante

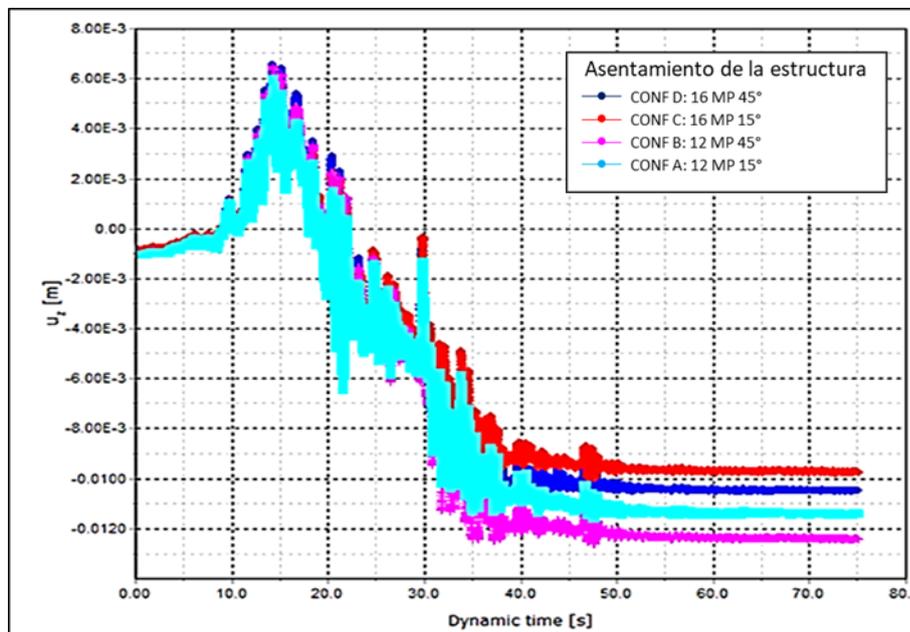


Figura 42: Asentamiento de la estructura para distintas configuraciones para un estrato licuable de 5 metros

Por último, para un estrato de 8 metros, se obtienen los menores asentamientos respecto al resto de las configuraciones, lo cual difiere entre 2 y 4 mm respecto a los métodos anteriores.

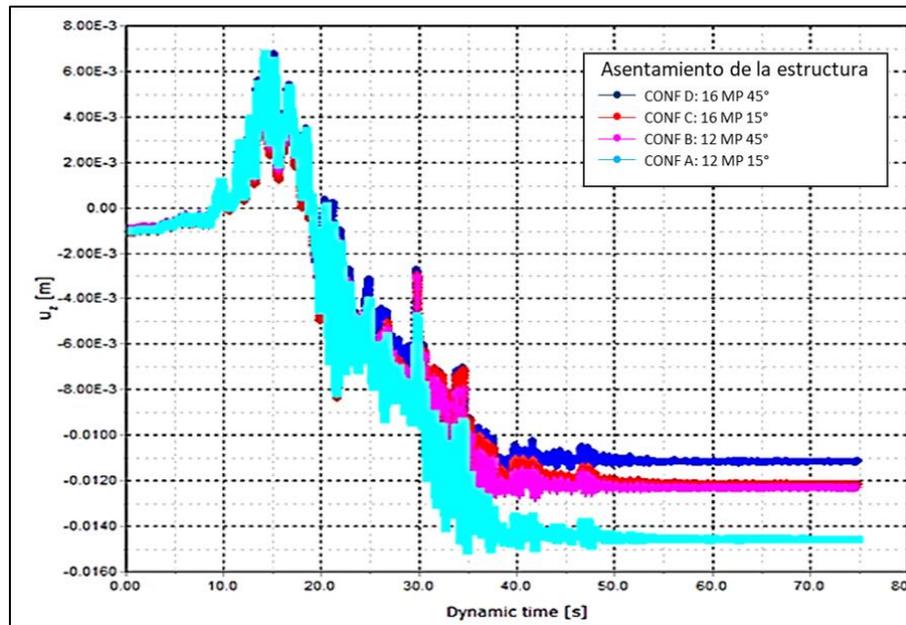


Figura 43: Asentamiento de la estructura para distintas configuraciones para un estrato licuable de 8 metros

Al utilizar el método de Ishihara (1993) para calcular el asentamiento teórico post licuefacción, se tiene los valores indicados en la Tabla 23. Sin embargo, dichos valores contrastan en alrededor de 3 a 4 veces más respecto al programa PLAXIS 3D, donde se realizaron análisis dinámicos sin considerar ningún tipo de estructura, para realizar un análisis comparativo de estos valores.

Tabla 23: Comparación de asentamientos mediante el método de Ishihara (1992) y PLAXIS 3D

Espesor estrato licuable [m]	Asentamiento PLAXIS 3D [cm]	Asentamiento teórico [cm]
3	2.0	8.4
5	4.0	14
8	7.0	22.4

Esta diferencia puede estar asociada a las condiciones de borde definidas en ambos ejes en el modelo, en donde, como se explicó en la sección anterior, se definió una condición de no deformación en la dirección del Eje Y, lo que implica una reducción de los asentamientos. O bien, los asentamientos propuestos por Ishihara (1993) sobreestima los asentamientos producidos por la licuefacción.

En cualquiera de los casos mencionados anteriormente, es necesario comparar con deformaciones in situ para verificar los asentamientos del terreno después del fenómeno. Aun así, cabe destacar que se observa un asentamiento del 10% respecto a la profundidad del estrato licuable para cada caso, lo cual es reducido al implementar la estructura con su respectivo sistema de fundación.

Respecto al asentamiento de la estructura, se generan pequeños desplazamientos diferenciales en el dado de fundación, y que se muestran en las figuras a continuación, las que representan el último caso que se estudió (configuración D):

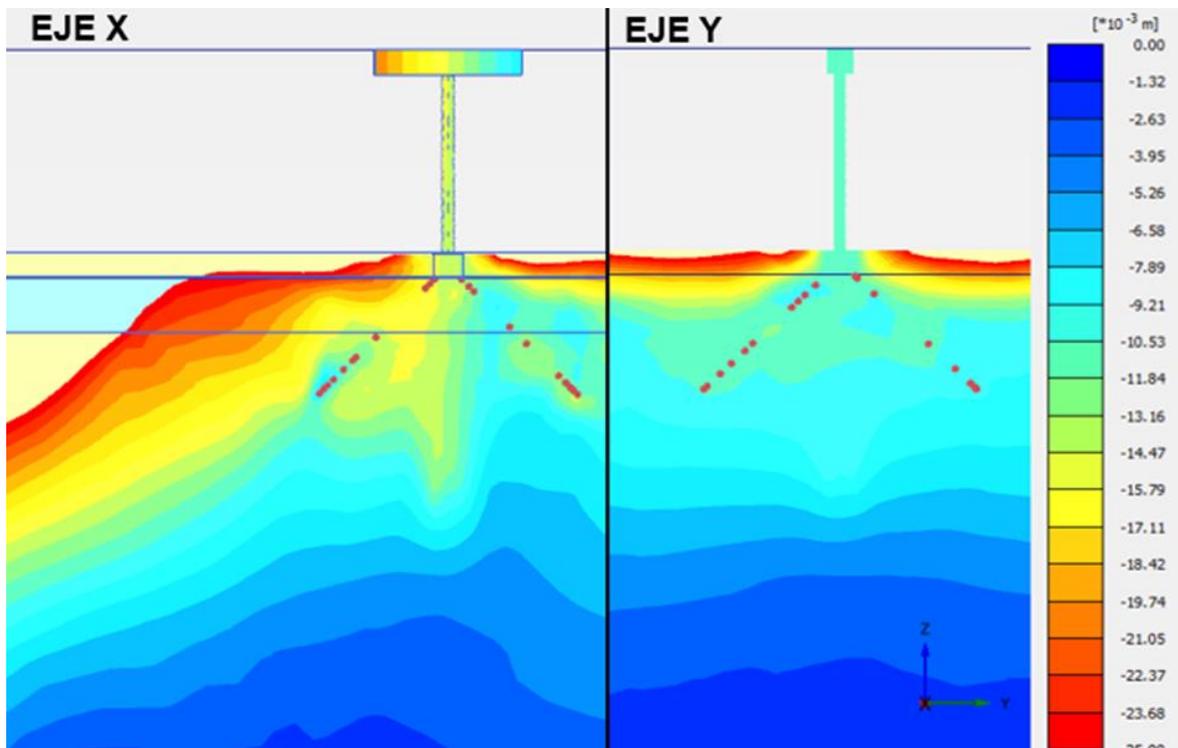


Figura 44: Vista en elevación para ambos ejes, Asentamientos para un estrato de 3 metros licuables. Imagen representativa

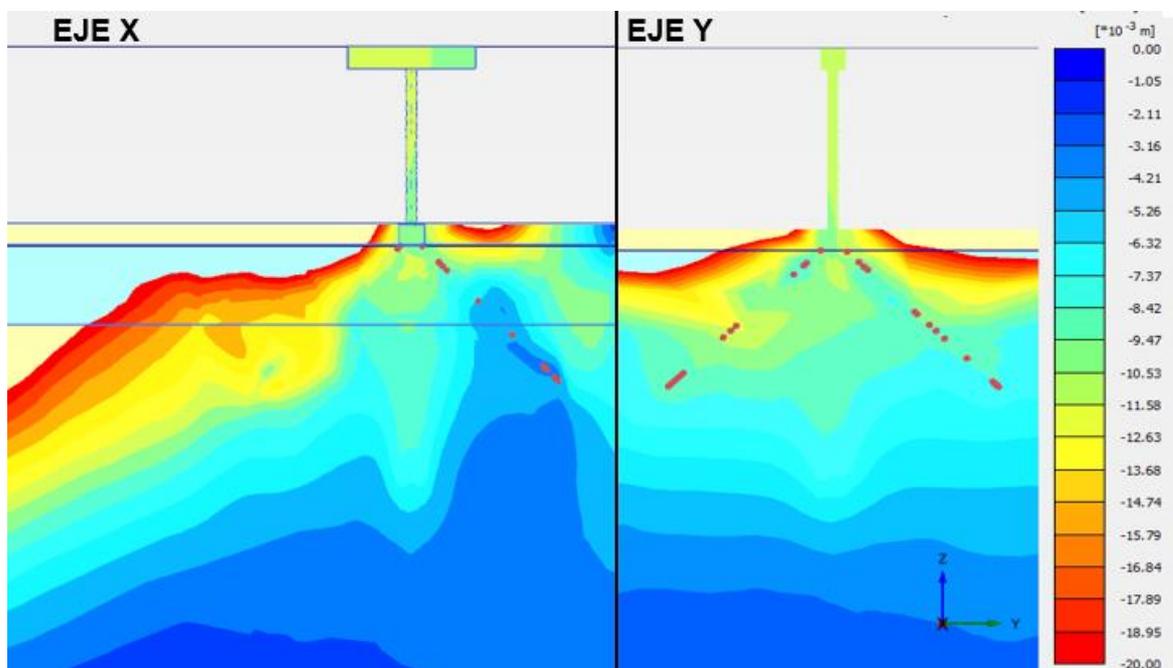


Figura 45: Vista en elevación para ambos ejes, Asentamientos para un estrato de 5 metros licuables. Imagen representativa

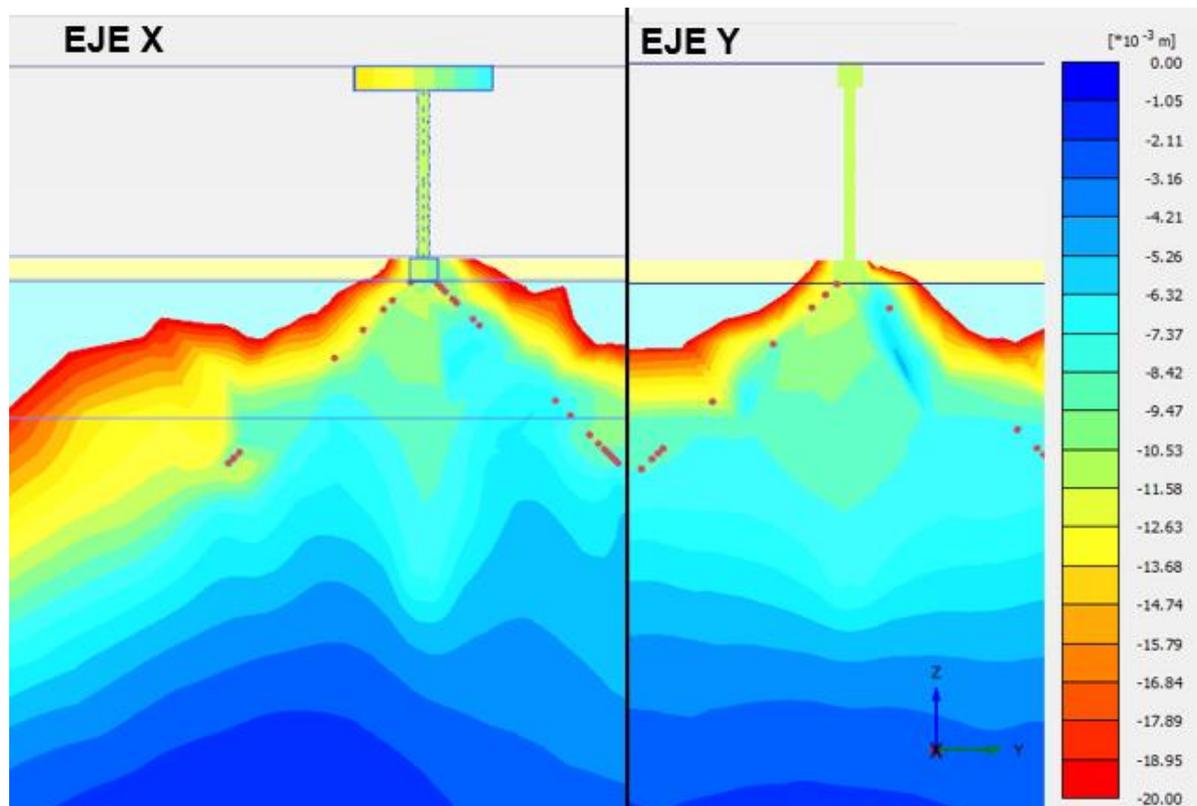


Figura 46: Vista en elevación para ambos ejes, Asentamientos para un estrato de 8 metros licuables. Imagen representativa

En la base de la fundación ocurren asentamientos diferenciales de 5.0, 3.0 y 2.0 mm para estratos licuables de 8.0, 5.0 y 3.0 metros respectivamente. Estos valores no representan un peligro real a la serviciabilidad y seguridad de la estructura

Con relación a los micropilotes, se tienen las solicitaciones máximas y mínimas a las que estos fueron sometidos durante la carga cíclica por cada profundidad de estrato licuable. El detalle de las solicitaciones de cada elemento se encuentra adjunta en el Anexo C.

Tabla 24: Solicitaciones máximas y mínimas respecto a una profundidad de estrato licuable de 3 metros, para cada configuración de micropilotes

Configuración	Perno	N [kN]		q ₁₂ [kN]		q ₁₃ [kN]		M2 [kN*m]		M3 [kN*m]	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
A	40/16	-2869	2930	-2288	710	-651	653	-120	107	-126	112
B	52/26	-2591	2530	-760	826	-270	239	-80	66	-161	158
C	40/16	-1848	2039	-1727	2179	-561	1183	-81	79	-97	108
D	40/16	-1759	1464	-1325	1312	-207	176	-32	28	-83	85
	52/26	-447	232	-315	306	-180	135	-23	21	-71	65

Tabla 25: Solicitaciones máximas y mínimas respecto a una profundidad de estrato licuable de 5 metros, para cada configuración de micropilotes

Configuración	Perno	N [kN]		q ₁₂ [kN]		q ₁₃ [kN]		M ₂ [kN*m]		M ₃ [kN*m]	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
A	40/16	-2224	2509	-797	1013	-1040	810	-118	154	-144	155
B	52/26	-2758	2882	-935	840	-420	331	-77	66	-160	157
C	40/16	-1769	1660	-1624	878	-961	1164	-101	95	-85	102
D	40/16	-2149	2143	-542	654	-219	288	-56	60	-111	88
	52/26	-516	179	-610	480	-180	369	-25	41	-76	133

Tabla 26: Solicitaciones máximas y mínimas respecto a una profundidad de estrato licuable de 8 metros, para cada configuración de micropilotes

Configuración	Perno	N [kN]		q ₁₂ [kN]		q ₁₃ [kN]		M ₂ [kN*m]		M ₃ [kN*m]	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
A	40/16	-2374	1619	-982	755	-595	558	-133	125	-122	130
B	52/26	-3192	3392	-2292	2303	-440	503	-94	71	-194	211
C	40/16	-1874	1419	-542	553	-616	563	-93	95	-109	124
D	40/16	-2059	1975	-544	668	-218	193	-218	96	-78	106
	52/26	-493	457	-667	624	-122	169	-23	34	-183	125

Cabe destacar que q₁₂ y M₃ indican los valores en la dirección de la sollicitación sísmica. En cambio, q₁₃ y M₂ representan los valores en la dirección perpendicular a la mencionada anteriormente.

Además, se observa que el desarrollo de los máximos valores de estos esfuerzos varía de acuerdo de la dirección en la que se encuentre el respectivo micropilote. Los que se encuentran en la dirección del sismo (valores de los parámetros q₁₂ y M₃) muestran su máximo valor en la interfaz de los suelos. En cambio, los elementos que se encuentran en la dirección perpendicular (q₁₃ y M₂) presentan su máximo valor en la base de la fundación, es decir, en la parte superior del micropilote.

Al contrastar los datos entregados en las tablas 24, 25 y 26, se advierten similitudes en los valores de cargas entre cada configuración de micropilotes, independiente de la profundidad del estrato licuable. Incluso, estos valores exceden en alrededor de 4 a 5 veces los valores de cargas de diseño que se utilizaron.

Respecto a la capacidad de los elementos, se tiene que el momento admisible que soportan los micropilotes TITAN 40/16 y 52/26 son de 143 y 308 kN·m respectivamente. Al tener esto en consideración, se observa que para los casos en donde se tienen estratos licuables de 5 y 8 metros (Tabla 25 y 26), existen configuraciones en donde se supera dicha capacidad para los micropilotes TITAN 40/16, lo que evidencia su falla debido a flexión, lo que no ocurre para los elementos TITAN 52/26.

Para evaluar la capacidad de pandeo debido a las cargas de compresión, se basa en las cargas admisibles indicadas por Davisson y Robinson (1965) en el capítulo 4.2.3, las cuales son de 750 y 842 kN para los micropilotes TITAN 40/16 y TITAN 52/26 respectivamente.

Al comparar los valores máximos entregados en las tablas 24, 25 y 26, se observa que los micropilotes verticales TITAN 52/26 pertenecientes a la configuración D, son los únicos que no superan los valores conseguidos por este método.

A partir de esto último, se hace necesario distinguir las cargas asociadas a elementos diagonales y verticales para observar su comportamiento frente a las solicitaciones a las que se encuentran sometidos. Así, se presentan las siguientes tablas detallando el comportamiento de los elementos para cada profundidad de estrato licuable:

Cabe destacar que los elementos destacados en la tabla corresponden a los micropilotes verticales

Tabla 27: Evaluación de pandeo mediante lo propuesto por Davisson y Robinson (1965), Configuración D

MP	Perno	3 metros		5 metros		8 metros	
		N[kN]	Condición	N[kN]	Condición	N[kN]	Condición
1	40/16	-1759	Pandea	-2021	Pandea	-2059	Pandea
2	40/16	-305	No Pandea	-356	No Pandea	-278	No Pandea
3	40/16	-1325	Pandea	-1846	Pandea	-1893	Pandea
4	40/16	-357	No Pandea	-221	No Pandea	-354	No Pandea
5	40/16	-1237	Pandea	-1765	Pandea	-1366	Pandea
6	40/16	-280	No Pandea	-334	No Pandea	-320	No Pandea
7	40/16	-1282	Pandea	-2149	Pandea	-1511	Pandea
8	40/16	-212	No Pandea	-284	No Pandea	-218	No Pandea
9	52/26	-447	No Pandea	-363	No Pandea	-368	No Pandea
10	52/26	-350	No Pandea	-516	No Pandea	-409	No Pandea
11	52/26	-398	No Pandea	-362	No Pandea	-493	No Pandea
12	52/26	-401	No Pandea	-346	No Pandea	-402	No Pandea
13	40/16	-1448	Pandea	-1686	Pandea	-1500	Pandea
14	40/16	-1347	Pandea	-1443	Pandea	-1344	Pandea
15	40/16	-128	No Pandea	-222	No Pandea	-255	No Pandea
16	40/16	-99	No Pandea	-211	No Pandea	-307	No Pandea

Tabla 28: Evaluación de pandeo mediante lo propuesto por Davisson y Robinson (1965), Configuración C

MP	Perno	3 metros		5 metros		8 metros	
		N[kN]	Condición	N[kN]	Condición	N[kN]	Condición
1	40/16	-1763	Pandea	-1359	Pandea	-1226	Pandea
2	40/16	-264	No Pandea	-477	No Pandea	-470	No Pandea
3	40/16	-1495	Pandea	-1745	Pandea	-1874	Pandea
4	40/16	-414	No Pandea	-355	No Pandea	-335	No Pandea
5	40/16	-1512	Pandea	-1746	Pandea	-1415	Pandea
6	40/16	-521	No Pandea	-446	No Pandea	-471	No Pandea
7	40/16	-1848	Pandea	-1411	Pandea	-1208	Pandea
8	40/16	-291	No Pandea	-439	No Pandea	-524	No Pandea
9	40/16	-813	Pandea	-685	No Pandea	-654	No Pandea
10	40/16	-942	Pandea	-539	No Pandea	-474	No Pandea
11	40/16	-1011	Pandea	-621	No Pandea	-411	No Pandea
12	40/16	-900	Pandea	-614	No Pandea	-439	No Pandea
13	40/16	-1629	Pandea	-1318	Pandea	-1206	Pandea
14	40/16	-1532	Pandea	-1769	Pandea	-1789	Pandea
15	40/16	-130	No Pandea	-258	No Pandea	-274	No Pandea
16	40/16	-134	No Pandea	-226	No Pandea	-197	No Pandea

Tabla 29: Evaluación de pandeo mediante lo propuesto por Davisson y Robinson (1965), Configuración B

MP	Perno	3 metros		5 metros		8 metros	
		N[kN]	Condición	N[kN]	Condición	N[kN]	Condición
1	52/26	-2575	Pandea	-2758	Pandea	-3192	Pandea
2	52/26	-367	No Pandea	-264	No Pandea	-474	No Pandea
3	52/26	-2591	Pandea	-2741	Pandea	-2747	Pandea
4	52/26	-371	No Pandea	-498	No Pandea	-427	No Pandea
5	52/26	-2282	Pandea	-2630	Pandea	-2830	Pandea
6	52/26	-318	No Pandea	-320	No Pandea	-632	No Pandea
7	52/26	-2448	Pandea	-2424	Pandea	-2489	Pandea
8	52/26	-199	No Pandea	-280	No Pandea	-577	No Pandea
9	52/26	-391	No Pandea	-395	No Pandea	-433	No Pandea
10	52/26	-475	No Pandea	-397	No Pandea	-342	No Pandea
11	52/26	-395	No Pandea	-544	No Pandea	-420	No Pandea
12	52/26	-388	No Pandea	-467	No Pandea	-515	No Pandea

Tabla 30: Evaluación de pandeo mediante lo propuesto por Davisson y Robinson (1965), Configuración A

MP	Perno	3 metros		5 metros		8 metros	
		N[kN]	Condición	N[kN]	Condición	N[kN]	Condición
1	40/16	-2576	Pandea	-2102	Pandea	-1549	Pandea
2	40/16	-418	No Pandea	-574	No Pandea	-475	No Pandea
3	40/16	-2429	Pandea	-2062	Pandea	-1858	Pandea
4	40/16	-677	No Pandea	-272	No Pandea	-408	No Pandea
5	40/16	-2390	Pandea	-2224	Pandea	-2374	Pandea
6	40/16	-691	No Pandea	-421	No Pandea	-394	No Pandea
7	40/16	-2869	Pandea	-2190	Pandea	-1403	Pandea
8	40/16	-610	No Pandea	-557	No Pandea	-512	No Pandea
9	40/16	-699	No Pandea	-805	Pandea	-558	No Pandea
10	40/16	-1027	Pandea	-475	No Pandea	-406	No Pandea
11	40/16	-992	Pandea	-482	No Pandea	-400	No Pandea
12	40/16	-731	No Pandea	-792	Pandea	-547	No Pandea

Además, se utiliza las recomendaciones entregadas por Anthoine (1987) para evaluar la compatibilidad que presentan los esfuerzos axiales y de corte mediante la ecuación de la elipse. Si bien, este es un criterio que se utiliza principalmente para sistema de anclajes, se decide usar en este caso debido a las similitudes que poseen estos elementos con los micropilotes. Por lo tanto, la ecuación que define la elipse es igual a:

$$\left(\frac{x}{R_n}\right)^2 + \left(\frac{y}{R_c}\right)^2 = 1 \quad (41)$$

En donde R_n corresponde a la máxima capacidad axial que soporta el elemento de acero (carga de fluencia), y R_c se define como la mitad de este valor.

No obstante, debido a los altos valores de carga axial y de corte presentes en las tablas 24, 25 y 26, solo se muestran los resultados para la configuración D, ya que si bien, los micropilotes TITAN 40/16 exceden en alrededor 3 veces el valor de carga axial permisible, los micropilotes TITAN 52/26 muestran un comportamiento que merece ser evaluado.

Así, se presentan los resultados para los valores máximos conseguidos de la configuración D de micropilotes, con sus respectivos casos de profundidad de estrato licuable

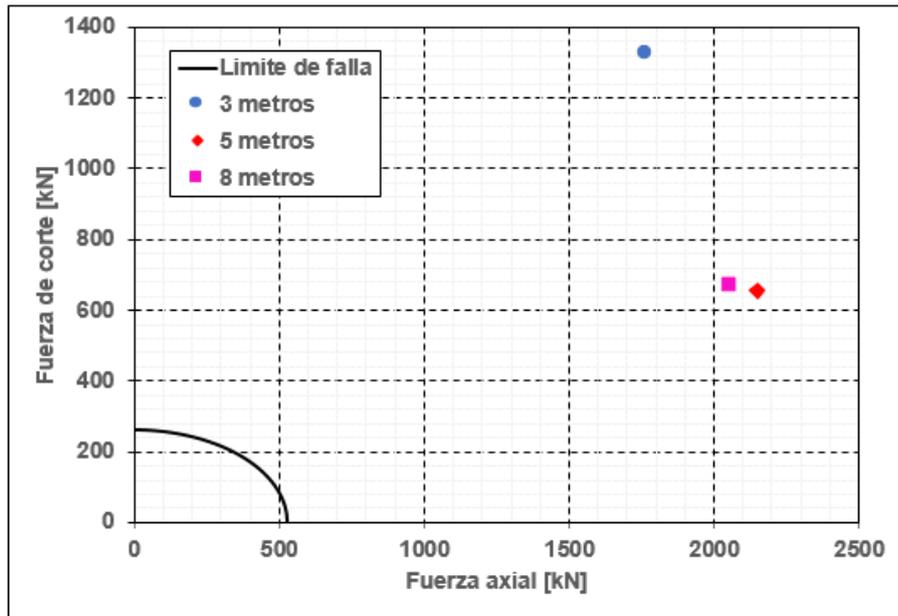


Gráfico 1: Cargas axial y de corte por cada profundidad de estrato licuable para configuración D, micropilotes 40/16

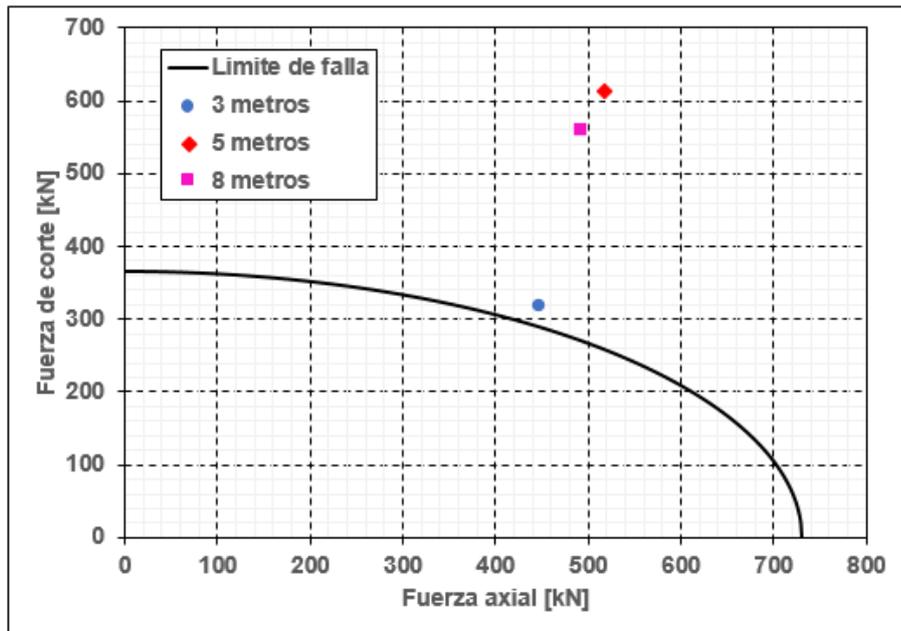


Gráfico 2: Cargas axial y de corte por cada profundidad de estrato licuable para configuración D, micropilotes 52/26

Se observa que, a partir de las cargas obtenidas, ninguno de los casos se encuentra dentro del área admisible según este criterio. Sin embargo, el caso de 3 metros licuables presente en el Gráfico 10, es el que se encuentra más cercano a cumplir con esta evaluación.

Por otra parte, se presentan los espectros de pseudo-aceleraciones respecto a la situación natural del suelo, y una vez que se ha instalado la estructura con el sistema de fundación de micropilotes.

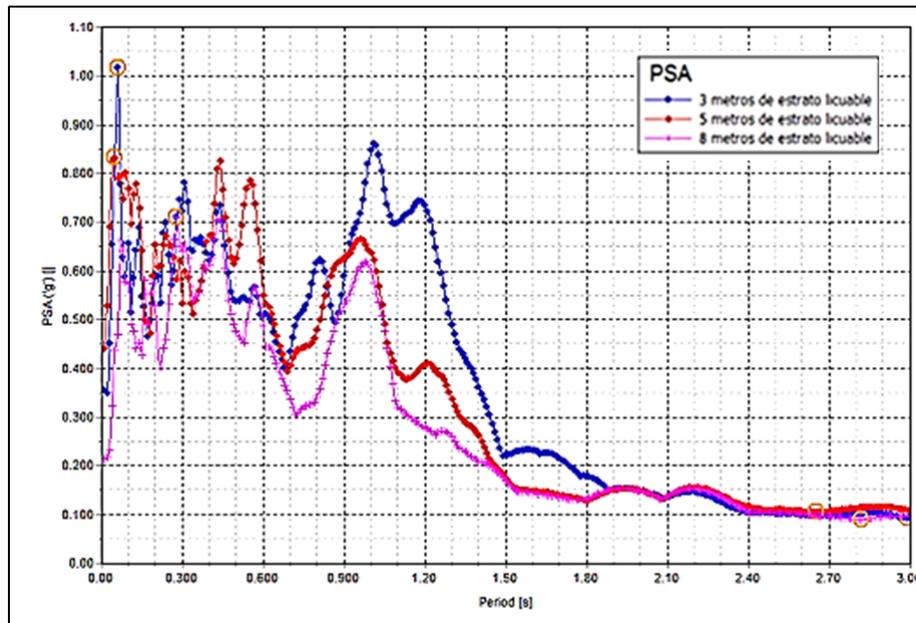


Figura 47: Espectro de pseudo aceleraciones para los 3 casos de estrato licuable, sin estructura ni sistema de reforzamiento

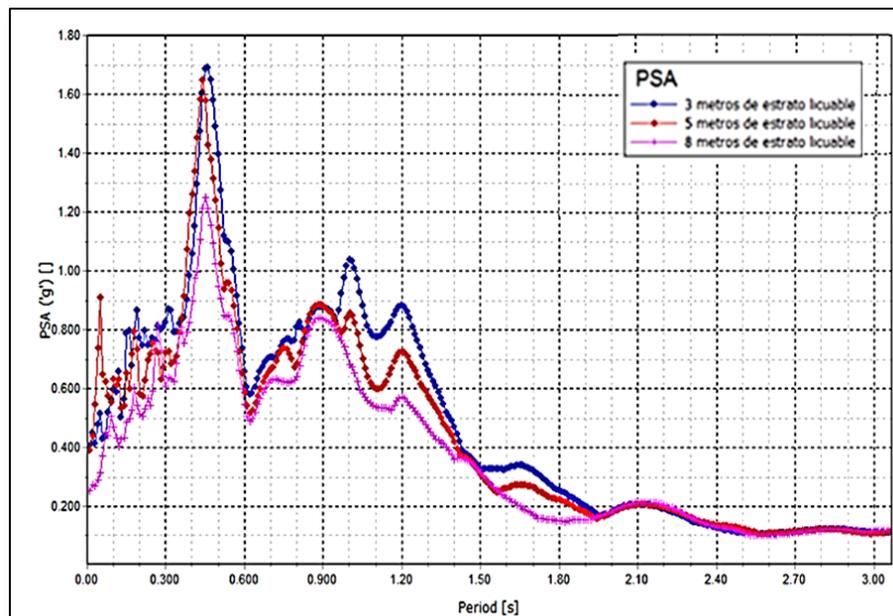


Figura 48: Espectro de pseudo aceleraciones para los 3 casos de estrato licuable con estructura

Si se suavizan los resultados entregados por ambas curvas, se aprecia el efecto de doble peak. Esta situación ocurre comúnmente en los suelos de Concepción.

Al respecto, Ruiz y Saragoni (2014) mencionan que uno de los peak se encuentra asociado a las vibraciones libres del suelo, con un amortiguamiento del 5%, y el otro peak es asociado a la influencia de la fuente sísmica.

Por otra parte, estos autores estimaron periodos para distintas ciudades de Chile en los que estos peak se pronuncian, entregando valores de 0.77

segundos para el periodo fundamental del suelo, y de 0.36 [s] para la fuente sísmica.

Al comparar con lo entregado por la situación base, se aprecia que el primer peak se encuentra en los 0.3 segundos, lo cual se encuentra acorde a lo entregado por estos autores. Sin embargo, el segundo peak se da alrededor de 1.0 segundos, lo cual es superior a lo indicado.

Ahora bien, al evaluar el periodo fundamental de la estructura, el cual corresponde a 1.4 [s], se obtiene una aceleración basal de alrededor 0.4 [g].

Para finalizar respecto a los micropilotes, se muestra el comportamiento superficial del suelo al esfuerzo de corte en los alrededores de la estructura. Para ello, se define el parámetro de esfuerzo de corte relativo, el cual entrega una indicación de la proximidad de un punto de esfuerzo a su envolvente de falla, y se define como:

$$\tau_{rel} = \frac{\tau_{mob}}{\tau_{max}} \quad (42)$$

En donde τ_{mob} corresponde al máximo valor del esfuerzo de corte, es decir, al radio del círculo de Mohr o al promedio entre los esfuerzos principales. En cambio, τ_{max} es el máximo valor de esfuerzo en donde el círculo de Mohr, al expandirse, toca la envolvente de falla dada por Coulomb, manteniendo el centro del círculo constante.

Cuando el parámetro del esfuerzo relativo alcanza su máximo valor (igual a 1), entonces el suelo ha alcanzado la envolvente de falla y se encuentra sometido a su máxima sollicitación.

En las siguientes figuras, se muestra el esfuerzo de corte relativo para cada profundidad de estrato licuable con su respectiva configuración de micropilotes:

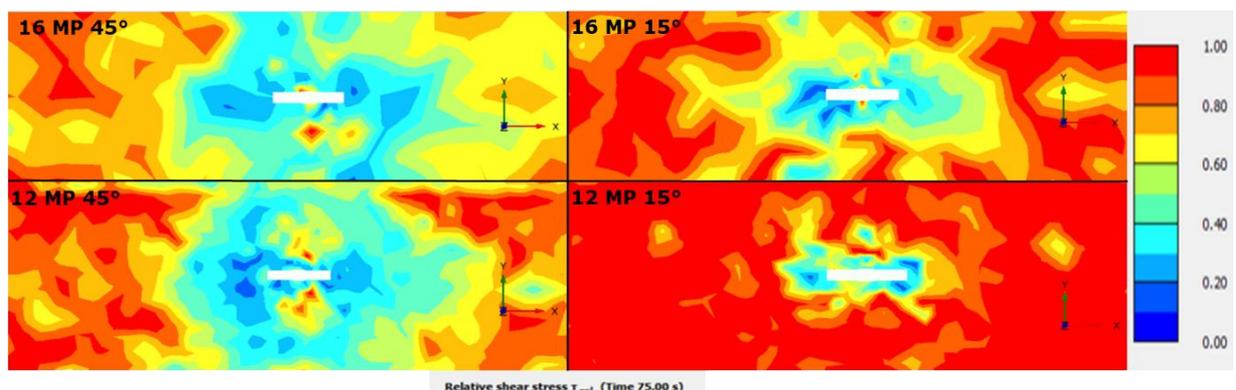


Figura 49: Esfuerzo de corte relativo alrededor de la estructura, a los 75 segundos, para un estrato licuable de 3 metros (vista en planta). Escala 1:1000

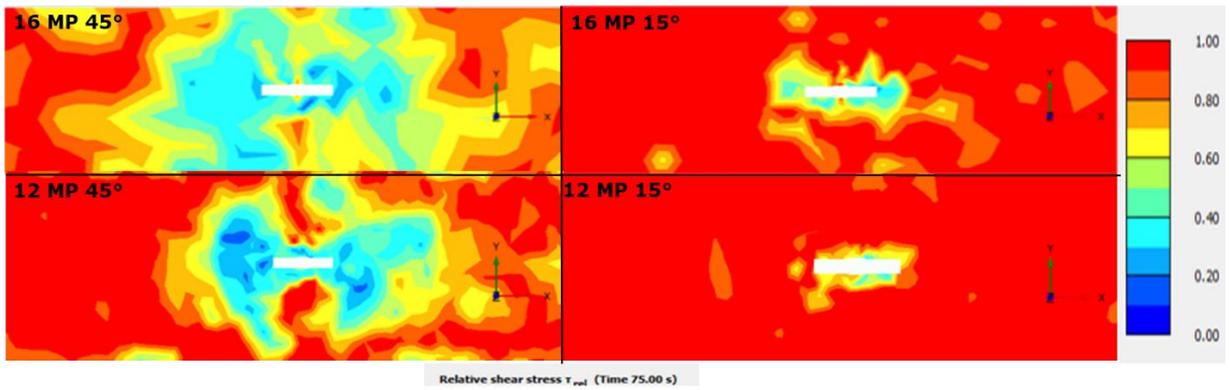


Figura 50: Esfuerzo de corte relativo alrededor de la estructura, a los 75 segundos, para un estrato licuable de 5 metros (vista en planta). Escala 1:1000

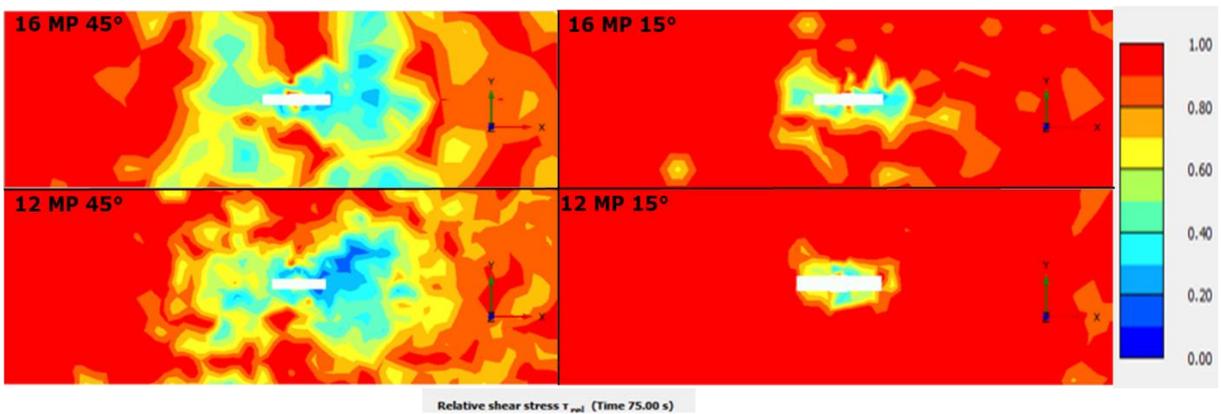


Figura 51: Esfuerzo de corte relativo alrededor de la estructura, a los 75 segundos, para un estrato licuable de 8 metros (vista en planta). Escala 1:1000

Al examinar las figuras anteriores, se observa que, al aumentar el ángulo de inclinación de los respectivos micropilotes, se obtiene una mayor resistencia al esfuerzo cortante que se refleja en la superficie del modelo. Sin embargo, mientras aumenta la profundidad del estrato licuable, las zonas que presentan una mejora van disminuyendo.

Al comparar las configuraciones cuyo ángulo de inclinación de sus elementos se encuentra en 15°, la mejora que se aprecia en la Figura 48 disminuye en alrededor de 3 metros respecto a la Figura 50, siendo este último un caso más desfavorable.

Otro aspecto por considerar es la influencia del número de elementos en la mejora a la resistencia al corte del suelo. Al contrastar las configuraciones cuyo ángulo de inclinación es el mismo, pero con diferente cantidad de elementos, se observa que en la dirección a lo largo del Eje Y, el esfuerzo de corte relativo alcanza un valor cercano a 1. Esto se debe principalmente a la disposición que poseen los elementos en cada configuración y demuestra que, debido a la ausencia de micropilotes, dicha área no presenta una mejora como en sus alrededores.

Para el modelo cuyo estrato licuable es de 3 metros, se tiene un radio de mejora de 13 metros aproximadamente para la configuración D. A medida que aumenta la profundidad del estrato a 5 y 8 metros de suelo licuable

(para la misma configuración de micropilotes), se evidencia una disminución de la mejora alrededor del Eje X de 2 metros, y una considerable reducción de la resistencia al corte en la dirección del Eje Y, a 8 y 3 metros respectivamente. Para el resto de las configuraciones de micropilotes se puede apreciar visualmente la reducción del esfuerzo de corte relativo alrededor de la estructura a medida que se varía la cantidad e inclinación de los elementos.

Una de las limitantes en la caracterización de este parámetro, es que no se puede visualizar el mejoramiento en la zona licuable debido a los micropilotes, ni el tiempo que demora en degradarse la resistencia añadida al suelo durante la carga cíclica.

Finalmente, a fin de corroborar la efectividad de los micropilotes, es que se presentan resultados asociados a la respuesta de un sistema fundación utilizando pilotes. Las cargas de diseño utilizadas corresponden a los valores máximos respecto a las fuerzas entregadas por los micropilotes. El detalle del diseño se encuentra adjunto en el Anexo D.

Al comparar los resultados entre ambas soluciones, para un estrato licuable de tres metros, se observan comportamientos similares en cuanto a asentamientos, donde existe una diferencia de alrededor de dos milímetros, presentando un mejor comportamiento el sistema de micropilotes.

Por último, se entregan los esfuerzos relativos de corte superficiales para el pilote, donde se aprecia una disminución del esfuerzo en la dirección Y de la estructura respecto al sistema de micropilotes.

Respecto al comportamiento del pilote, existen esfuerzos significativos que se generan en la interfaz de los suelos, lo que delata la formación de grietas y pérdida de la resistencia del elemento.

Cabe destacar que al considerar el pilote como un elemento de volumen en PLAXIS 3D, no se pueden obtener los valores máximos de las solicitaciones a las que fue sometida durante el evento sísmico.

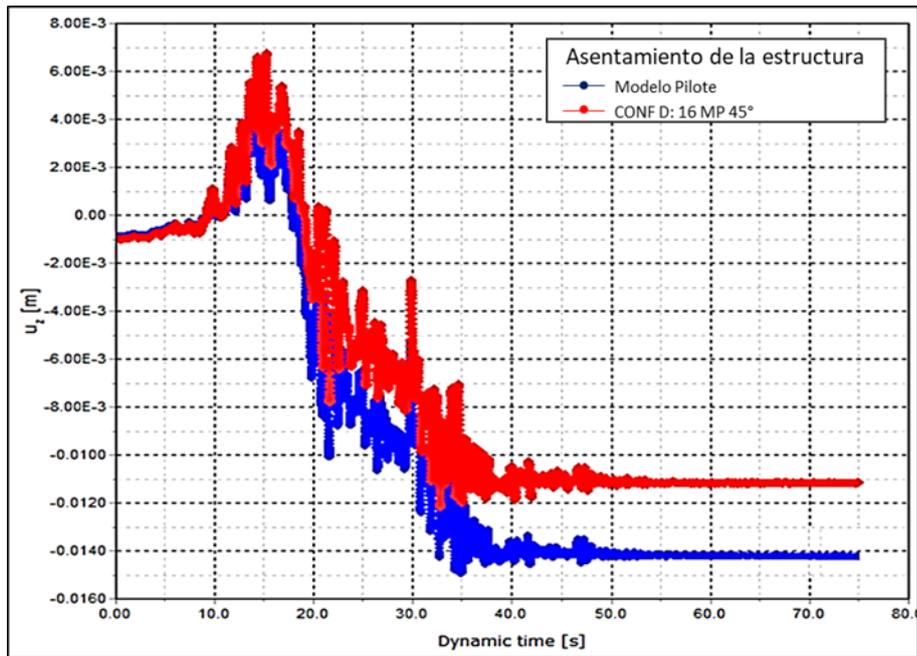


Figura 52: Asentamiento de la estructura para un estrato licuable de 3 metros, pilote y micropilotes

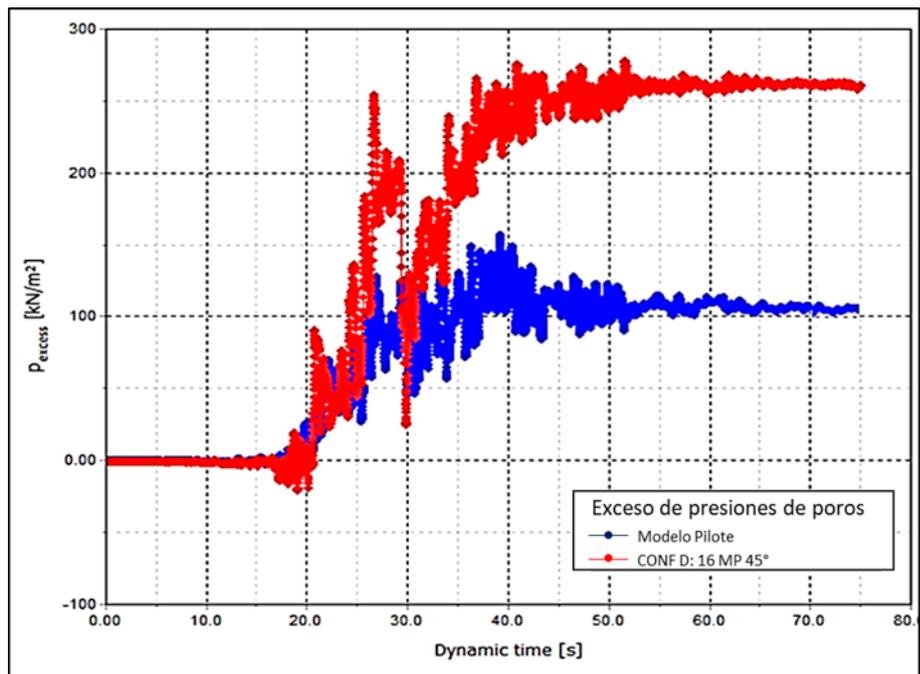


Figura 53: Exceso de presiones de poros vs tiempo para estrato licuable de 3 metros, pilote y micropilotes, en un radio de 5 metros del centro del dado de fundación de la estructura, en la dirección de aplicación del sismo.

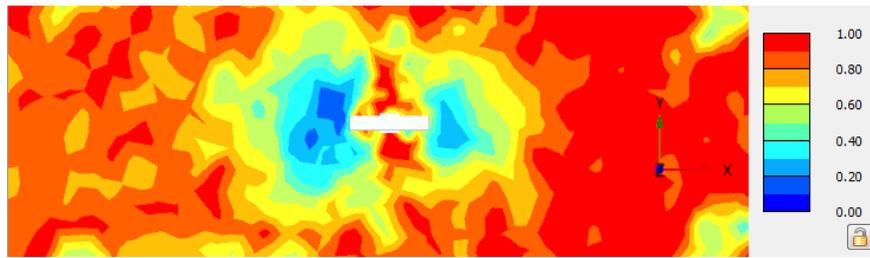


Figura 54: Esfuerzo de corte relativo a los 75 segundos para estrato licuable de 3 metros utilizando pilote (vista en planta). Escala 1:1000

7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los parámetros para el modelo constitutivo UCB3D-PLM se obtuvieron a través de correlaciones con SPT, lo cual es una forma práctica de determinar los parámetros constitutivos del suelo. No obstante, los parámetros que no dependen del SPT, tal como el factor de post licuefacción y de densificación, resultan ser sensibles a las variaciones de sus valores.

El factor de post licuefacción determina el mínimo valor del módulo de corte que debe alcanzar el suelo después de cierta cantidad de ciclos. Una vez alcanzado este valor, los nuevos ciclos se mantienen constantes y no se sigue generando un incremento de las presiones de poros, por lo que la licuefacción no es alcanzada. Es por esto por lo que es recomendable utilizar valores bajos de este parámetro, como el utilizado en este trabajo (se utilizó un valor de 0.02 de un máximo de 1.0).

Al observar los gráficos 35, 36 y 37, los que corresponden a los de exceso de presiones de poro, se visualiza que el inicio de la licuefacción comienza alrededor de los 20 segundos y finaliza cerca de los 45, por lo que la degradación del módulo de corte en ese instante es suficiente para alcanzar el máximo valor de las presiones de poros.

Por otra parte, el factor de densificación regula la densificación del suelo y los ciclos de las presiones de poros que se generan durante la licuefacción. Si bien, Makra (2013) recomienda utilizar un valor de 0.45 (de un máximo de 1) para este parámetro, se observa que en los gráficos 35, 36 y 37, la evolución de las presiones de poros posee ciclos irregulares y poco realistas.

Sin embargo, esto último se debió al no considerar el esfuerzo de corte estático inicial en el suelo que se genera debido a la instalación de la estructura (como es el caso del punto (c) de la Figura 55), ya que el mismo autor destaca que este esfuerzo puede conducir a una disminución poco certera de la resistencia cíclica del modelo y a inestabilidades numéricas durante la fase cíclica en las presiones de poros.

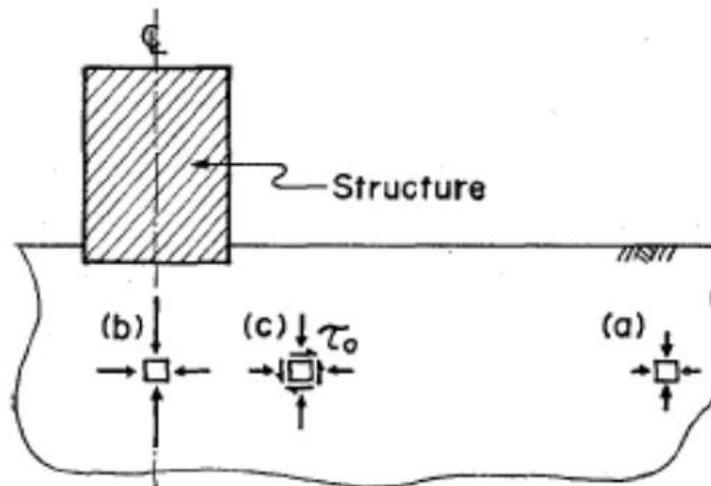


Figura 55: Esfuerzos existentes bajo una estructura antes de la ocurrencia de un sismo. Yoshimi & Oh-Oka, 1975

Este último aspecto se corrige aumentando la densificación y la rigidez del suelo, por lo que se debe considerar un factor de densificación igual a 1.0

A pesar de estas diferencias, se logra una coincidencia satisfactoria para la determinación del inicio de la licuefacción a través de las presiones de poro generada, aunque la fase cíclica puede ser mejorable por lo antes mencionado.

Debido a los problemas mencionados anteriormente, se desprende que es necesario contar con resultados de ensayos triaxiales cíclicos para la arena licuable a modelar en PLAXIS 3D, ya que de esta manera se conoce la respuesta del suelo y se simulan correctamente sus características.

Por otro lado, al contrastar los gráficos de presiones de poros con respecto a los de desplazamiento horizontal, se logran identificar las dos fases propuestas por Cubrinovski (2010), en donde se aprecia una fase cíclica y una de desplazamientos residuales.

Durante la fase cíclica, se observa que cuando se alcanza el menor peak de presiones de poros, se obtiene el máximo desplazamiento horizontal. Esto último se advierte al comparar los gráficos 35 y 38, específicamente para la configuración D, la cual representa de manera adecuada este comportamiento a los 30 segundos aproximadamente. Para el resto de las configuraciones es difícil comparar debido a los ciclos irregulares presentes en las presiones de poros.

Asimismo, se visualiza que, para dicha configuración, las presiones de poros se estabilizan alrededor de los 250 kN/m² una vez desarrollada la fase cíclica, consiguiendo así una mejora cercana al 30% respecto a la configuración que le prosigue.

En general, la configuración D presenta el mejor comportamiento en este aspecto a medida que aumenta la profundidad del estrato licuable. Sin

embargo, no es suficiente, ya que compromete la capacidad de algunos micropilotes.

Respecto a los micropilotes, se utilizó lo propuesto por Cadden (2002) para evaluar la susceptibilidad de estos al pandeo, lo que entregó que estos elementos debiesen sufrir este fenómeno en el momento que el suelo licue y su módulo lateral comience a degradarse (Figura 19).

Si bien, Cadden (2002) ofrece una manera directa de evaluar el pandeo, no ofrece alternativas al momento de evaluar la carga crítica de pandeo de los elementos, aparte de lo propuesto por Bjerrum (1957). Es por ello por lo que se utilizó lo formulado por Davisson y Robinson (1965) para complementar este aspecto, obteniendo así cargas admisibles que fueron superadas en ciertos casos.

Cabe mencionar que una de las limitantes de este modelo equivalente entregado por Davisson y Robinson (1965), es que, al considerar un módulo de balasto constante (como se realizó en este trabajo), el largo que desarrolle el micropilote en diferentes profundidades de suelo no tiene relevancia, ya que solo se utiliza un largo L 's

También existen limitaciones al ábaco propuesto por Cadden (2002), ya que este solo considera propiedades geométricas de la pila y las del material, pero no diferencia pilas de distinta longitud, sino que solo se basa en las propiedades del micropilote respecto a su diámetro y composición. Además, el procedimiento para el cálculo de la carga crítica mediante Bjerrum (1957), asume que no se aplican cargas horizontales ni de momento en la parte superior de la pila, lo cual restringe un montón de casos y aplicaciones.

Respecto a los esfuerzos en los micropilotes, y a lo detallado en las tablas del Anexo C, se observa que los elementos diagonales ubicados en la dirección del sismo son los que presentan las mayores solicitaciones, tanto axial como de corte y momento, en cada configuración de micropilotes. Esto muestra que no todos los micropilotes sufrieron pandeo o presentaron fallas en su mecanismo, sino que solo fueron los elementos diagonales presentes en la dirección crítica, tal y como se señala en las tablas 27, 28, 28 y 30.

Además, al aumentar la inclinación de los micropilotes, el corte a los que los elementos se encuentran sometido disminuye al comparar las configuraciones D y C para un estrato licuable de 3 metros. Sin embargo, la disminución del corte se observa de manera considerable en los elementos diagonales que se encuentran en la dirección del sismo, pero en la orientación en torno al Eje Y (q_{13}), siendo aproximadamente dos veces mayor el valor de este parámetro en la configuración con menor inclinación de sus elementos.

En general, los elementos verticales correspondientes a TITAN 52/26, presentan un comportamiento competente respecto al máximo valor de

carga axial y de momento que soportan. Incluso los valores de corte máximo se pueden clasificar dentro del rango aceptable de la elipse propuesta por Anthoine (1987). De hecho, tanto para la configuración D (16 micropilotes, elementos verticales TITAN 52/26) como para la configuración B (12 micropilotes, elementos verticales TITAN 52/26), el mejor comportamiento de los elementos verticales se observa para el caso de 3 metros licuables, en donde en ningún caso se supera la capacidad de los elementos según el diseño.

Aun así, la capacidad de los elementos diagonales fue superada totalmente, obteniendo cargas 2-3 veces mayores a las admisibles, evidenciando la falta de rigidez en estos.

Por otro lado, con el fin de evaluar los desplazamientos provocados por la carga sísmica en la estructura, tanto horizontales como verticales, es que se utiliza lo propuesto por Bozozuk, M. (1978)., quien propone los desplazamientos admisibles en puentes en base a análisis que realizó. Este autor relaciona estos tipos de deformación con el fin de evitar daños estructurales, y asegurando un rango de desplazamiento tolerable que permita mantener la funcionalidad de esta. Así, considerando un suelo licuable de 3 metros, se tiene que la configuración D de micropilotes, presenta un desplazamiento lateral, una vez finalizada el sismo, de aproximadamente 30 mm, y un asentamiento del orden de 12 mm, por lo que se encuentra en el límite de un rango tolerable de deformación. Gráficamente se representa como:

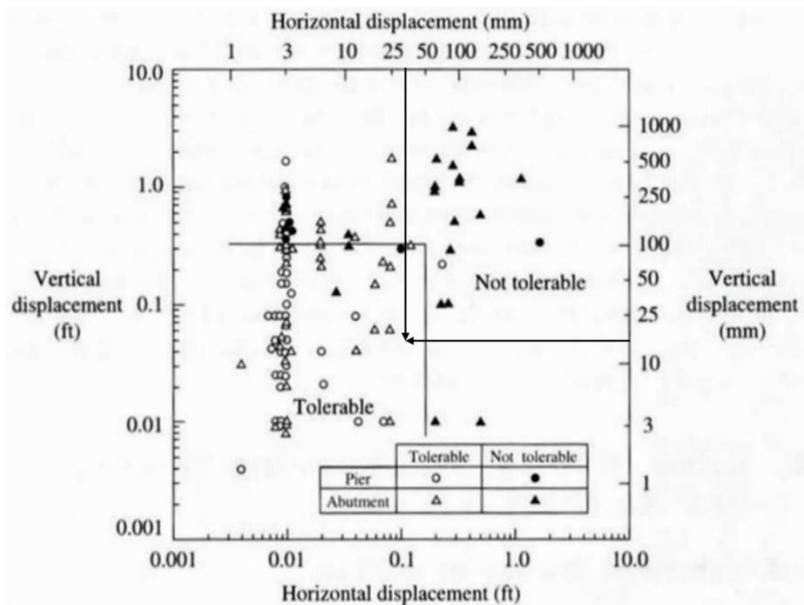


Figura 56: Asentamientos tolerables para la fundación de una pasarela considerando una configuración D de micropilotes. Bozozuk, M. 1978

Cabe mencionar que, para el resto de las configuraciones y profundidades de estrato licuable, el desplazamiento de la fundación posee valores similares al caso en estudio, los cuales se encuentran en un rango entre 20-30 mm respecto al desplazamiento lateral, y no más de 15 mm para el asentamiento de la fundación. A partir de esto se concluye que, al

considerar solo la condición final de la estructura, los casos se encuentran dentro de un rango tolerable de deformación.

No obstante, en la mayoría de los casos, durante la aplicación de la carga sísmica y el desarrollo de la licuefacción, los desplazamientos laterales alcanzan valores que son alrededor de 5 veces mayor al desplazamiento final en la fase cíclica, los cuales se estabilizan cerca de los 40 segundos, una vez que las presiones de poros hayan alcanzado su máximo valor. Al evaluar los desplazamientos en esta condición se encuentra en un rango no tolerable de deformaciones.

Por otra parte, la clasificación sísmica del terreno, según la norma NCh433+DS61 considera unidades que van desde el mejor comportamiento (Roca: Suelo Tipo A), al de mayor exigencia sísmica (Suelos Tipo E o de consistencia mediana).

Los suelos desde Tipo A hasta Tipo E poseen valores que permiten conocer su espectro de pseudo aceleraciones dependiendo de las características dadas por la norma. Sin embargo, existe un suelo Tipo F que no posee un espectro definido y debe ser evaluado mediante estudios de riesgos sísmicos. Esto genera inconvenientes ya que al momento del diseño se utilizan los datos asociados al peor tipo de suelo disponible en la norma, el cual es el E.

En el actual trabajo, se entregaron espectros de pseudo aceleraciones para distintas profundidades de estrato licuable, incorporando la mejora realizada en la zona con micropilotes.

Al comparar los gráficos 47 y 48, los que corresponden a la respuesta del terreno natural y de la estructura con micropilotes, se observa un efecto de mejoramiento, que implica una rigidización del terreno. Esto último se encuentra asociado a una amplificación de la señal sísmica para altas frecuencias (o bajos periodos). De igual forma, se produce una modificación en la frecuencia natural del terreno debido al cambio de rigidez, llevándolo a un menor periodo fundamental (reducción de 0.2 segundos).

A continuación, se compara el espectro de pseudo aceleraciones con la mejora realizada al terreno, con los suelos Tipo E y D indicados en la norma chilena, con el fin de observar gráficamente el mejoramiento indicado:

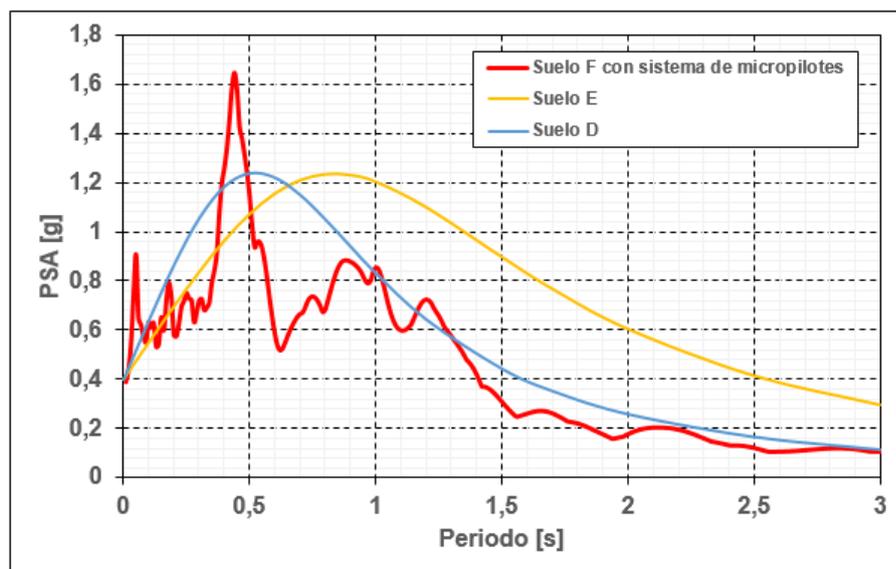


Gráfico 3: Espectro de pseudo aceleraciones para suelos Tipo E, Tipo D, y espectro obtenido de la mejora del terreno con micropilotes. Elaboración propia.

De este último gráfico, se observa que el mejoramiento en la zona del suelo permite definir el suelo Tipo F como un suelo de categoría superior, siendo más acorde al peak presentado por el suelo Tipo D.

Ahora bien, para poder establecer un índice de comparación de la efectividad del método de micropilotes frente a estratos licuables, es que se incorporó el diseño de pilote para un estrato licuable de 3 metros. Si bien, se observa un comportamiento similar en ambos casos, los esfuerzos generados por la capa de suelo licuable, al perder su rigidez, comprometen de cierta forma la sección de la pila al verse sometida a estos esfuerzos.

Finalmente, como base para terminar la comparación las alternativas, se toma en cuenta el costo y la practicidad que resultan las opciones disponibles para lograr dicho propósito. Por lo que se realiza un análisis económico entre las alternativas del pilote y de los micropilotes (Configuración D) para un estrato licuable de 3 metros, que es donde esta última configuración de micropilotes presenta su mejor comportamiento con relación al pandeo y la compatibilidad entre cargas axiales y de corte. Cabe destacar que los valores que se entregan son aproximaciones de los costos reales, con el fin de no entregar información asociada a la empresa.

Los costos asociados a la ejecución de los micropilotes (considerando mantenimiento, funcionamiento y mano de obra de los equipos) es de 2 UF/ml. En cambio, la ejecución del pilote en sí (perforación, mano de obra) posee un costo de 4 UF/ml, al cual se le debe agregar el valor del hormigón ($2,2 \text{ UF/m}^3$) y el acero (montaje, elementos) el que corresponde a 28 UF/ton. De igual manera, se debe estimar los costos de traslado y movimiento de equipos considerando que la zona de ejecución de este

tipo de obras se encuentra en Concepción (a 500 km aproximadamente de la capital de Santiago), zona que posee suelos licuables en abundancia.

Para el traslado del equipo de micropilote, es necesario utilizar un camión cama baja más un camión pluma, entregando un precio aproximado de 350 UF. Por el contrario, para el movimiento del equipo del pilote, es necesario utilizar 4 camiones cama baja, lo que da un costo cercano a las 1200 UF.

Al tener en cuenta los valores mencionados anteriormente, se debe evaluar la cantidad de metros lineales de micropilotes utilizados en fundación, lo que corresponde a 156 metros lineales para el caso cuya profundidad de estrato licuable es de 3 metros. Así, se tiene que:

Tabla 31: Evaluación económica opción micropilotes

	Precio [UF]
Ejecución	312
Movilización	350
TOTAL	662

Para la instalación del pilote tradicional (solo uno), se requieren 92 m³ de hormigón y 0.045 toneladas de acero. Además, la perforación e instalación del pilote posee un costo por metro lineal la cual debe ser incluida en los cálculos. Se tiene que:

Tabla 32: Evaluación económica opción pilote

	Precio [UF]
Hormigón	20
Acero	1
Ejecución	60
Movilización	1200
TOTAL	1281

Se observa que el proceso de instalación y ejecución para un dado de fundación, en términos de costos, es mucho más económico utilizar un pilote, ya que el costo de ejecución es 4 veces mayor al del pilote aproximadamente. Sin embargo, la mayor diferencia se presenta al momento de la traslación del equipo, lo que dificulta realizar los pilotes y realza la opción de los micropilotes, ya que los costos totales de este método se reducen en un 50% en comparación al primero.

Un dato interesante es evaluar los costos considerando que el lugar en que se realiza la obra es Santiago. Esta suposición conlleva a una reducción de los costos de traslado a 45 y 360 UF para el micropilote y pilote respectivamente, pero, aun así, la opción del micropilote sigue siendo viable, presentando una reducción de alrededor el 20% respecto al pilote.

Otro punto por destacar es el tiempo que demora la ejecución de estas alternativas, lo cual es un aspecto importante al momento de escoger entre una opción u otra. Al examinar el rendimiento de ambos equipos, se tiene para los micropilotes se tiene un ritmo de 100 a 150 ml/día. Por el contrario, el pilote posee un rendimiento general de 1 pilote/día. Esto conlleva a que, para la realización de la opción con micropilotes, se tarde en torno a de un día y medio. No así con la opción de pilotes, que solo demoraría un día en completar la faena. No obstante, el plazo requerido para completar la tarea con los micropilotes no supera los dos días por fundación, y al considerar distintas cepas de la pasarela, la movilización del equipo sería casi instantánea, lo que difiere de la maquinaria del pilote, la cual tardaría alrededor de medio día en trasladarse de lugar, igualando el rendimiento total del micropilote.

8. CONCLUSIONES

- **Configuraciones de micropilotes**

A lo largo de este trabajo, se realizaron diferentes configuraciones de micropilotes, con el fin de evaluar la manera en que influye la cantidad, inclinación y rigidez de estos elementos.

En términos de aceleraciones, las configuraciones propuestas logran disminuir la aceleración que siente la estructura respecto a sus alrededores. Además, se observa que a medida aumenta la cantidad e inclinación de los elementos diagonales, el radio de mejora aumenta alrededor de un 30% (unos tres metros aproximadamente). Sin embargo, se genera una amplificación cercana a 0.1 [g] en el centro de la estructura, tal y como se observó a partir de las Figuras 26 a 31. Aun así, todas las configuraciones presentan un comportamiento aceptable para la cepa diseñada.

Respecto a la influencia en la cantidad de micropilotes, se observa que a medida que aumenta el número de elementos, los esfuerzos disminuyen en ellos debido a la nueva distribución que se genera. Además, el aporte ante un aumento de los elementos comienza a ser cada vez más relevante en cuanto incrementa la profundidad del estrato licuable, llegando a tener diferencias de alrededor 1000 kN en la carga axial, entre configuraciones de 12 y 16 micropilotes.

Por otra parte, los elementos inclinados poseen un papel fundamental al momento de soportar las sollicitaciones sísmicas y debido a la licuefacción. Estos micropilotes son los que resultan tener las mayores sollicitaciones en las 4 configuraciones de micropilotes, debido a una carga externa asociada a la licuación que supera por varias veces la sollicitación que impone la estructura y el sismo.

Esto último implica que la rigidez de dichos elementos debe ser aumentada considerando un nuevo tipo de micropilote TITAN, ya que los dos tipos de micropilotes que se utilizaron no satisfacen ni logran resistir las cargas debido a la licuefacción y pérdida de rigidez del suelo.

Por lo tanto, para las configuraciones estudiadas, y debido a las cargas a las que fueron sometidos los elementos, se recomienda utilizar rigideces de micropilotes superiores a las del TITAN 52/26, manteniendo la cantidad de 16 micropilotes.

Además, a partir de los resultados obtenidos, se sugiere modificar los elementos a micropilotes TITAN 103/51. Este se escoge debido a la alta rigidez a flexión y axial que muestra este elemento. Además, entrega una carga crítica de pandeo de 4485 kN, utilizando el método de Davisson y Robinson (1965). Sin embargo, se debe realizar el modelo para evaluar la

eficiencia de esta propuesta, la cual no se pudo llevar a cabo por temas de tiempos.

- **Diseño de micropilotes**

Respecto a la evaluación del pandeo entregada por el ábaco de Cadden (2002), y debido a la degradación del módulo lateral del suelo durante la licuefacción, se debe chequear la ocurrencia de este fenómeno para todos los micropilotes tipo TITAN. Para este caso, y según el ábaco de diseño dado en la Figura 19, se necesitan micropilotes que posean un "pile factor" superior a $100 \text{ in}^2/\text{kip}$ para satisfacer la demanda, lo cual no puede cumplirse con los micropilotes tipo TITAN disponibles.

Además, al realizar el diseño de micropilotes en este tipo de suelo, solo se consideró que el micropilote debe atravesar el suelo no competente, por lo que, para las mismas cargas de diseño, se le agrega un largo adicional que depende de la profundidad del estrato. Pese a que, el suelo al licuar ejerce cargas sobre el elemento que no se encuentran consideradas en el diseño, debido al movimiento y la pérdida de resistencia de este.

Por lo tanto, se recomienda al menos incorporar en el diseño cargas asociado al peso propio del estrato licuable que soporta en aquella sección.

Además, el diseño de micropilotes entrega que efectivamente los micropilotes inclinados ubicados en la dirección del sismo soportan más carga lateral respecto al resto de los elementos. Sin embargo, al observar las sollicitaciones para la configuración D entregadas por PLAXIS 3D, se tienen valores que son 4 a 6 veces mayores al original, dependiendo de la profundidad del estrato licuable considerada.

Asimismo, el diseño de estos elementos entrega que los micropilotes verticales son los que debiesen soportar la mayor cantidad de carga axial y de momento, lo cual difiere según los resultados entregados por PLAXIS 3D, ya que los elementos diagonales superan su capacidad alrededor de 20 veces, evidenciando la falla del elemento.

Por otra parte, la comparación que se genera con la solución de pilotes es útil para observar la respuesta de los micropilotes respecto a este, el cual es uno de los métodos más recurrentes para combatir los suelos licuables. Así, se pretende demostrar la competitividad de esta solución.

- **PLAXIS 3D**

Por último, respecto al PLAXIS 3D, una de las grandes limitaciones durante el desarrollo de este trabajo fueron los modelos dinámicos implementados, ya que con el fin de simplificar el problema y considerando la duración que tardaban (alrededor de 24 a 72 hrs), se decidió no diseñar la estructura completa.

Aun así, las simulaciones realizadas permitieron conocer el comportamiento del modelo constitutivo UBC3D-PLM respecto a la respuesta dinámica que genera en la estructura, y al efecto que genera en los elementos de fundación.

Por otra parte, si se dispone de tiempo, se recomienda ingresar una fase de disipación de presiones de poros para observar el comportamiento de la estructura post licuefacción, con el objetivo de simular correctamente dicha condición y observar los asentamientos que se generan una vez las presiones de poros se reestablecen a su nivel inicial.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos, se concluye que el modelo constitutivo UBC3D-PLM caracteriza de buena manera el fenómeno de la licuefacción. No obstante, en este trabajo no se pudo sacar el máximo provecho debido a la falta de ensayos sobre el suelo específico que se estudia, lo cual dificulta el proceso de calibración y obtención de parámetros.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Armour, T., Groneck, P., Keeley, J., & Sharma, S. (2000). *Micropile design and construction guidelines: implementation manual* (No. FHWA-SA-97-070). United States. Federal Highway Administration.
- [2]. Beaty, M. H., Byrne, P. M. (2011). Ubc sand constitutive modelo. Itasca UDM website 904aR.
- [3]. Beaty, M. H., Perlea, V. G. (2011). Several observations on advanced analyses with liquefiable materials. Thirty first annual USSD conference on 21st century dam design-advances and adaptations, 1369-1397.
- [4]. Cadden, A. W., & Gómez, J. E. (2002). Buckling of Micropiles-A Review of Historic Research and Recent Experiences. *ADSC-IAF Micropile Committee*.
- [5]. CLOUTERRE. 1991. Recommendations Clouterre 1991: Soil nailing recommendations for designing, calculating, constructing and inspecting earth support systems using soil nailing. Report No. FHWA-SA-93-026, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- [6]. Cubrinovski, M. (2007). Key issues in the analysis of piles in liquefying soils. En: 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering: 25-28 June 2007. Greece.
- [7]. Cubrinovski, M., Haskell, J. M. M., & Bradley, B. A. (2010, July). Soil-pile interaction in liquefying soils: modelling issues. In *International Workshop on Soil-Foundation-Structure-Interaction* (pp. 93-100).
- [8]. Bozozuk, M. (1978). Bridge foundations move. *Transportation Research Record*, 678, 17-21.
- [9]. Brinkgreve, R. B. J., Kumaraswamy, S., & Swolfs, W. M. (2006). Plaxis material models manual. *The Netherlands: Delft University of Technology & PLAXIS B*, 2006.
- [10]. Daftari, A., & Kudla, W. (2014). Prediction of soil liquefaction by using UBC3D-PLM model in Plaxis. *International Journal of Environmental, Ecological, Geological and Mining Engineering*.
- [11]. Dao, T. P. T. (2011). Validation of PLAXIS embedded piles for lateral loading. Master of Science Thesis. *The Netherlands: Delft University of Technology*. 115p.

- [12]. Davisson, M. T., & Robinson, K. E. (1965). Bending and buckling of partially embedded piles. In *Soil Mech & Fdn Eng Conf Proc/Canada/*.
- [13]. Deutsches Institut für Normung. (1983). Small diameter injection piles – Construction procedure, design and permissible loading. DIN 4128. Germany. 26p.
- [14]. Deutsches Institut für Normung. (1975). Bored cast in place piles – Formation, design and bearing capacity. DIN 4014. Germany. 18p.
- [15]. Deutsches Institut für Normung. (1976). Permissible loading of subsoil. DIN 1054. Germany. 17p.
- [16]. Engin, H. K. (2007). *Report on tension pile testing using embedded piles*. Plaxis internal report. Delft (The Netherlands).
- [17]. Fowler, A. C (1997). *Mathematical models in the applied sciences* (Vol. 17). Cambridge University Press.
- [18]. Hegazy, A. A. E. (2014) Analysis of buckling load for micropiles embedded in a weak soil under vertical axial loads. En: International Academy of Science, Engineering and Technology. USA. Pp. 155-166.
- [19]. Ishihara, K., & Yoshimine, M. (1992). Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and foundations*, 32(1), 173-188.
- [20]. Ishihara, K. (1993). Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Geotechnique*, 43(3), 351-451
- [21]. Ishihara K (1997). Geotechnical aspect of the 1995 Kobe earthquake. In: Proceedings of the 14th international conference on soil mechanics and foundation engineering. Terzaghi Oration, Hamburg, 2047-2073
- [1]. Instituto Nacional de Normalización. (1996). Diseño sísmico de edificios. Nch433of96. ISO 690. Santiago. Chile. INN. 56 p.
- [2]. Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2006). Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 26(2-4), 115-130.
- [3]. Laera, A., & Brinkgreve, R. B. J. (2015). Site response analysis and liquefaction evaluation. *The Netherlands*, pp. 24-37

- [4]. Liao, S. S., & Whitman, R. V. (1986). Overburden correction factors for SPT in sand. *Journal of geotechnical engineering*, 112(3), 373-377.
- [5]. Makra, A. (2013). Evaluation of the UBC3D-PLM constitutive model for prediction of earthquake induced liquefaction on embankment dams. Master graduation Thesis. *The Netherlands: Delft University of Technology*. 112p.
- [6]. Moayed, R. Z., & Naeini, S. A. (2012). Improvement of loose sandy soil deposits using micropiles. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(3), 334-340.
- [7]. Naein, S., & Moayed, R. Z. (2006). Improving liquefaction potential strength by using Micropiles. *IAEG the Geological Society of London*, 333-338.
- [8]. Petalas, A., Galavi, V., & Brinkgreve, R. B. J. (2012). Validation and verification of a practical constitutive model for predicting liquefaction in sands. In *Proceedings of the 22nd European young geotechnical engineers conference, Gothenburg, Sweden*, 167-172.
- [9]. Petalas, A., & Galavi, V. (2013). Plaxis Liquefaction Model UBC3DPLM. *PLAXIS Report*.
- [10]. Robertson, P. K., & Wride, C. E. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian geotechnical journal*, 35(3), 442-459.
- [11]. Ruiz D. y Saragoni G.R., (2008). Two peaks response spectra (2PRS) for subduction earthquakes considering soil and source effects. 14th World Conference on Earthquake Engineering. China.
- [12]. Saragoni, R., & Ruiz, S. (2012). Implicaciones y nuevos desafíos de diseño sísmico de los acelerogramas del terremoto del 2010. *Mw*, 8, 127-146.
- [13]. Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*
- [14]. Shahrour, I., & Juran, I. (2004). Seismic behaviour of micropile systems. *Ground improvement*, 8, 109-120.
- [15]. Shields, D. R. (2007). Buckling of micropiles. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 133(3), 334-337.

- [16]. Theinat, A. K. (2015). 3D numerical modelling of micropiles interaction with soil & rock. Master of science in Civil Engineering. USA. Missouri University of Science and Technology. 205p
- [17]. Turan, A., El Naggar, M. H., & Hinchberger, S. (2008). Lateral behavior of micro-pile groups under static and dynamic loads. In *Proceedings of the 4th Canadian conference on geohazards*.
- [18]. Vogt, N., Vogt, S., & Kellner, C. (2009). Buckling of slender piles in soft soils. *Bautechnik*, 86(S1), 98-112.
- [19]. Youd, T. L., & Idriss, I. M. (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 127(4), 297-313.

ANEXO A: ANÁLISIS DE LICUEFACCIÓN

A partir de los resultados de ensayos SPT obtenidos de la revisión de proyectos se realiza un análisis semi empírico utilizando el método descrito en el marco teórico. Para cada proyecto se realizaron los cálculos utilizando el nivel freático descrito en la revisión de proyectos y considerando un sismo de magnitud 7.5. El peso específico del suelo del suelo varía entre 1.8 y 1.9 ton/m³ dependiendo de proyecto y se consideran los suelos como arenas limpias, sin contenido de finos.

Tabla 33: Análisis de licuefacción pasarela Playa Blanca Sur

Prof [m]	N ₆₀	σ'vo [ton/m ²]	Cn	(N ₁) _{60,cs}	r _d	CSR	CRR _{MW=7.5}	F.S.
0.8	7.0	3.5	1.7	11.9	1.0	0.3	0.1	0.51
1.8	7.0	4.6	1.5	10.3	1.0	0.3	0.1	0.41
2.7	12.0	5.4	1.4	16.4	1.0	0.3	0.2	0.51
3.9	29.0	6.4	1.3	36.3	1.0	0.4	1.5	4.10
4.9	30.0	7.2	1.2	35.3	1.0	0.4	1.2	3.11
5.9	32.0	8.1	1.1	35.7	1.0	0.4	1.3	3.23
6.8	35.0	8.8	1.1	37.3	0.9	0.4	1.9	4.65

Tabla 34: Análisis de licuefacción pasarela Parque el Coronel

Prof [m]	N ₆₀	σ'vo [ton/m ²]	Cn	(N ₁) _{60,cs}	r _d	CSR	CRR _{MW=7.5}	F.S.
1.0	9.0	3.9	1.6	14.4	1.0	0.3	0.2	0.59
2.0	26.0	5.6	1.3	34.7	1.0	0.3	1.0	3.94
2.9	32.0	6.4	1.2	39.9	1.0	0.3	4.0	13.5
4.0	40.0	7.4	1.2	46.4	1.0	0.3	66.0	202.2
5.0	23.0	8.3	1.1	25.2	1.0	0.3	0.3	0.86
6.0	25.0	9.2	1.0	26.0	1.0	0.4	0.3	0.88
6.7	31.0	9.9	1.0	31.2	0.9	0.4	0.6	1.56

Tabla 35: Análisis de licuefacción Hospital Chile Chico

Prof [m]	N ₆₀	σ'vo [ton/m ²]	Cn	(N ₁) _{60,cs}	r _d	CSR	CRR _{MW=7.5}	F.S.
0.6	6.0	3.1	1.8	10.7	1.0	0.3	0.1	0.48
1.6	9.0	4.9	1.4	12.9	1.0	0.3	0.1	0.54
2.6	5.0	2.8	1.9	9.4	1.0	0.6	0.1	0.19
3.6	5.0	8.6	1.1	5.4	1.0	0.3	0.1	0.35
4.6	7.0	9.9	1.0	7.0	1.0	0.3	0.1	0.37
5.6	8.0	10.7	1.0	7.7	1.0	0.3	0.1	0.36
6.6	7.0	11.6	0.9	6.5	0.9	0.3	0.1	0.31
7.6	9.0	12.4	0.9	8.1	0.9	0.3	0.1	0.33
8.0	50.0	12.7	0.9	44.3	0.9	0.3	22.6	70.48
8.6	50.0	13.2	0.9	43.5	0.9	0.3	16.0	48.91

Tabla 36: Análisis de licuefacción pasarela Moly-Cop

Prof [m]	N ₆₀	σ'vo [ton/m ²]	Cn	(N ₁) _{60,cs}	r _d	CSR	CRR _{MW=7.5}	F.S.
1.3	9.0	4.1	1.6	14.0	1.0	0.3	0.1	0.58
1.4	7.0	4.2	1.5	10.8	1.0	0.3	0.1	0.47
1.8	7.0	4.5	1.5	10.5	1.0	0.3	0.1	0.42
2.7	22.0	5.0	1.4	31.0	1.0	0.3	0.6	1.73
3.1	22.0	5.3	1.4	30.2	1.0	0.3	0.5	1.46
3.7	17.0	5.7	1.3	22.5	1.0	0.4	0.2	0.67
4.2	17.0	6.0	1.3	22.0	1.0	0.4	0.2	0.63
4.6	23.0	6.3	1.3	29.0	1.0	0.4	0.4	1.13
5.0	23.0	6.6	1.2	28.4	1.0	0.4	0.4	1.02
5.6	28.0	6.9	1.2	33.6	1.0	0.4	0.8	2.11
6.1	28.0	7.2	1.2	32.9	1.0	0.4	0.8	1.83
6.6	29.0	7.6	1.1	33.3	0.9	0.4	0.8	1.90
7.1	29.0	7.9	1.1	32.7	0.9	0.4	0.7	1.69
7.6	30.0	8.2	1.1	33.1	0.9	0.4	0.8	1.78
8.0	30.0	8.5	1.1	32.5	0.9	0.4	0.7	1.60

A partir de estos resultados se definieron las características de los estratos de arena a considerar en el modelo. Para adquirir un valor representativo del estrato licuable y no licuable, se considera el promedio del índice de penetración estándar dado por los SPT de los 4 análisis presentados en las tablas anteriores distinguiéndolos por su factor de seguridad. Así, se promediaron todas las filas cuyo índice de seguridad es menor a 1 para definir el NSPT a utilizar en el modelo para el estrato licuable, y se consideraron las filas cuyo índice de seguridad fuese mayor a 1 para definir el estrato competente. De esta manera, se realiza un nuevo análisis empírico para determinar el factor de seguridad de los estratos definidos en la Tabla 4

Tabla 37: Análisis de licuefacción modelo con 3 metros de estrato licuable

Prof [m]	N ₆₀	σ'vo [ton/m ²]	Cn	(N ₁) _{60,cs}	r _d	CSR	CRR _{MW=7.5}	F.S.
1.35	36	4.6	1.5	53	1.0	0.3	8284	-
4.35	13	6.8	1.2	16	1.0	0.4	0.2	0.45

Tabla 38: Análisis de licuefacción modelo con 5 metros de estrato licuable

Prof [m]	N ₆₀	σ'vo [ton/m ²]	Cn	(N ₁) _{60,cs}	r _d	CSR	CRR _{MW=7.5}	F.S.
1.4	36.0	4.6	1.5	53.3	1.0	0.3	8284.9	-
6.4	13.0	8.4	1.1	14.2	1.0	0.4	0.1	0.38

Tabla 39: Análisis de licuefacción modelo con 8 metros de estrato licuable

Prof [m]	N ₆₀	σ'vo [ton/m ²]	Cn	(N ₁) _{60,cs}	r _d	CSR	CRR _{MW=7.5}	F.S.
1.4	36.0	4.6	1.5	53.3	1.0	0.3	8284.9	-
9.4	13.0	10.8	1.0	12.5	0.9	0.4	0.1	0.32

ANEXO B: DISEÑO MICROPILOTES

B.1. Descripción del modelo de análisis

El modelo de análisis se basa en suponer que el dado de fundación, el que corresponde a un bloque de hormigón armado, se comporta como un cuerpo rígido indeformable, de esta manera, los grados de libertad quedan expresados únicamente como los desplazamientos y giros de la fundación, los cuales se expresan medidos en el centro de gravedad de la fundación. Dicho punto se denomina O. Los grados de libertad son los siguientes:

$$GDL = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta\theta_{yz} \\ \Delta\theta_{zx} \\ \Delta\theta_{xy} \end{bmatrix} \quad (43)$$

La definición de estos grados de libertad se muestra gráficamente.

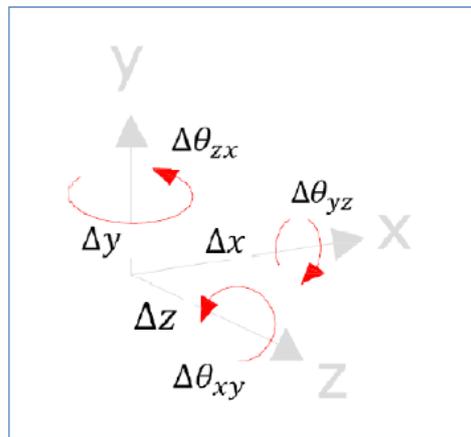


Figura 57: Definición grados de libertad

Es importante destacar que el objetivo de esta modelación es obtener la sumatoria de las reacciones de cada micropilote, trasladadas al punto O, para que sean iguales a las solicitaciones en la fundación, por lo que la solución del problema viene por encontrar el valor de los grados de libertad GDL que generan que la sumatoria de reacciones de cada micropilote satisfice el equilibrio con las solicitaciones. Se correspondientes

$$\sum_{i=1}^n F_o^i(GDL) = S_o \quad (44)$$

Donde n corresponde a la cantidad de micropilotes instalados y $F_o^i(GDL)$ la reacción que genera el micropilote cuando se le imponen ciertas deformaciones asociadas a los GDL.

Lo primero a realizar es escoger una disposición adecuada en la que no se genere ningún tipo de vinculación entre micropilotes. Luego, se procede a el traslado de las solicitaciones al centro de gravedad de la fundación con la siguiente expresión

$$F_p = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_{yz} \\ M_{zx} \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -d_z & -d_y \\ d_z & 0 & -d_x \\ -d_y & d_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Fx' \\ Fy' \\ Fz' \end{bmatrix} \quad (45)$$

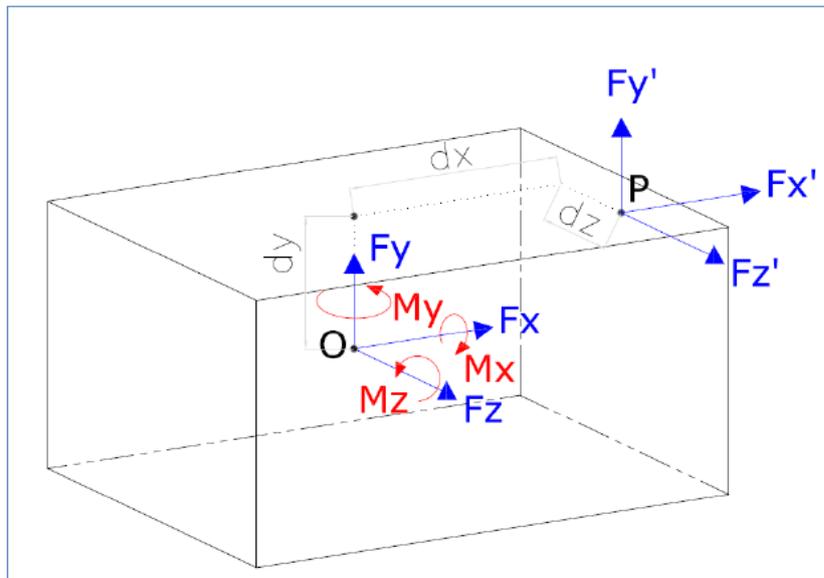


Figura 58: Traslado de las cargas al centro de gravedad de la fundación

Ahora bien, para simular cada micropilote, se idealiza el comportamiento como un elemento axial tipo bielas que se encuentra vinculado en su extremo superior (punto A) y al inferior (punto B).

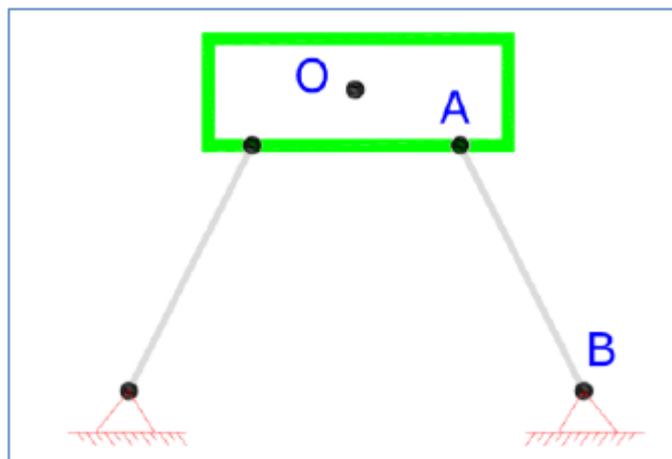


Figura 59: Vinculación estructural para el análisis de los micropilotes

La vinculación del micropilote con la fundación se encuentra en A, ubicado en las coordenadas (A_x, A_y, A_z) , con lo cual las siguientes expresiones permiten obtener el desplazamiento del punto A en cada eje según el valor de cada GDL definido en la ecuación (43). En este caso particular, se consideran que los giros son infinitesimales, por lo que se puede asumir que las longitudes L_{xy} , L_{yz} y L_{zx} son constantes en el tiempo, por lo que será posible admitir un comportamiento vectorial para los giros

$$\Delta A_x = L_{xy} \cdot \cos(\theta_{xy} + \Delta\theta_{xy}) + L_{zx} \cdot \sin(\theta_{zx} + \Delta\theta_{zx}) - 2 \cdot A_x + \Delta x \quad (46)$$

$$\Delta A_y = L_{xy} \cdot \sin(\theta_{xy} + \Delta\theta_{xy}) + L_{yz} \cdot \cos(\theta_{yz} + \Delta\theta_{yz}) - 2 \cdot A_y + \Delta y \quad (47)$$

$$\Delta A_z = L_{zx} \cdot \cos(\theta_{zx} + \Delta\theta_{zx}) + L_{yz} \cdot \sin(\theta_{yz} + \Delta\theta_{yz}) - 2 \cdot A_z + \Delta z \quad (48)$$

En donde:

$$L_{xy} = \sqrt{(A_x)^2 + (A_y)^2} \quad (49)$$

$$L_{yz} = \sqrt{(A_y)^2 + (A_z)^2} \quad (50)$$

$$L_{zx} = \sqrt{(A_z)^2 + (A_x)^2} \quad (51)$$

$$\theta_{xy} = \text{sign}(A_y) \cdot \text{acos}\left(\frac{A_x}{L_{xy}}\right) \quad (52)$$

$$\theta_{yz} = \text{sign}(A_z) \cdot \text{acos}\left(\frac{A_y}{L_{yz}}\right) \quad (53)$$

$$\theta_{zx} = \text{sign}(A_x) \cdot \text{acos}\left(\frac{A_z}{L_{zx}}\right) \quad (54)$$

Sin embargo, en el caso de que las rotaciones se consideren finitas, es decir, pseudovectoriales, estas no se pueden sumar como vectores y, por tanto, no son magnitudes vectoriales. Debido a esto último, es que las rotaciones finitas son difíciles de manejar. No obstante, en el análisis que se considera en este trabajo, los giros serán siempre aplicados en el mismo orden. En este caso se aplicará primero el giro $\Delta\theta_{xx}$, luego el $\Delta\theta_{yy}$, y finalmente el $\Delta\theta_{zz}$. El objetivo es encontrar la nueva posición A a partir de los giros y desplazamientos como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\Delta A = {}^I\Delta A + {}^{II}\Delta A + {}^{III}\Delta A + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (55)$$

Donde A' corresponde a la nueva posición debido al giro en X, A'' a la posición debido al giro en Y, y A''' debido al giro en Z.

$$A' = \begin{bmatrix} A'x \\ A'y \\ A'z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ax \\ Lyz \cdot \cos(\theta_{yz} + \Delta\theta_{yz}) \\ Lyz \cdot \sin(\theta_{yz} + \Delta\theta_{yz}) \end{bmatrix} \quad (55)$$

$$A'' = \begin{bmatrix} A''x \\ A''y \\ A''z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Lzx \cdot \sin(\theta_{zx} + \Delta\theta_{zx}) \\ A'y \\ Lzx \cdot \cos(\theta_{zx} + \Delta\theta_{zx}) \end{bmatrix} \quad (56)$$

$$A''' = \begin{bmatrix} A'''x \\ A'''y \\ A'''z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Lxy \cdot \cos(\theta_{xy} + \Delta\theta_{xy}) \\ Lxy \cdot \cos(\theta_{xy} + \Delta\theta_{xy}) \\ A''z \end{bmatrix} \quad (57)$$

En donde:

$${}^I\Delta A = A' - A = \begin{bmatrix} A'x - Ax \\ A'y - Ay \\ A'z - Az \end{bmatrix} \quad (58)$$

$${}^{II}\Delta A = A'' - A' = \begin{bmatrix} A''x - A'x \\ A''y - A'y \\ A''z - A'z \end{bmatrix} \quad (59)$$

$${}^{III}\Delta A = A''' - A'' = \begin{bmatrix} A'''x - A''x \\ A'''y - A''y \\ A'''z - A''z \end{bmatrix} \quad (60)$$

Luego, con el desplazamiento en el punto A, se puede obtener la longitud del elemento deformado

$$L' = \sqrt{(A_x + \Delta A_x - B_x)^2 + (A_y + \Delta A_y - B_y)^2 + (A_z + \Delta A_z - B_z)^2} \quad (61)$$

Por lo que la deformación de cada elemento se puede expresar como

$$\Delta L = L' - L \quad (62)$$

Donde L, longitud inicial, se define:

$$L = \sqrt{(A_x - B_x)^2 + (A_y - B_y)^2 + (A_z - B_z)^2} \quad (63)$$

Lo que resta, es trasladar la reacción que se genera en A hacia O. A partir del principio de comportamiento de carga - deformación, se obtiene las reacciones que genera cada micropilote sobre la fundación, por lo que, al trasladar las cargas al centro, se utiliza la siguiente expresión cinemática.

$$F_o = \begin{bmatrix} Fx_o \\ Fy_o \\ Fz_o \\ M_{yz_o} \\ M_{zx_o} \\ M_{xy_o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -A_z - \Delta A_z & A_y + \Delta A_y \\ A_z + \Delta A_z & 0 & -A_x - \Delta A_x \\ -A_y - \Delta A_y & A_x + \Delta A_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Fx \\ Fy \\ Fz \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} Fx \\ Fy \\ Fz \end{bmatrix} \quad (64)$$

De esta manera, para que se cumpla el equilibrio en (44), se debe encontrar las deformaciones del cuerpo rígido dadas por los grados de libertad GDL, tal que se cumpla dicha ecuación.

Finalmente, para evaluar la capacidad interna y externa de cada elemento, se utiliza la siguiente tabla acerca de las especificaciones técnicas de los pernos

Tabla 40: Propiedades de micropilotes perforante Tipo Ischebeck

		TITAN 30/16	TITAN 30/11	TITAN 40/16	TITAN 52/26	TITAN 73/53	TITAN 73/45	TITAN 103/78
Diámetro externo nominal	mm	30	30	40	52	73	73	103
Diámetro interno nominal	mm	16	11	16	26	53	45	78
Carga ultima	KN	220	320	660	929	1160	1194	1950
Carga de fluencia	KN	180	260	525	730	970	1236	1570
Área de la sección	mm ²	382	446	879	1337	1631	2247	3139
Diámetro de perforación	mm	76	76	90	115	130	130	150

B.2. Capacidad de carga interna

Los factores parciales de seguridad están definidos para los siguientes casos de carga:

C1: Cargas permanentes y variables ocurrentes en el estado normal (caso estático)

C2: Cargas permanentes y variables ocurrentes en las etapas constructivas (caso estático)

C3: Cargas permanentes y variables ocurrentes en estados extraordinarios (caso sísmico y otro eventual)

En las siguientes tablas se presentan los factores de mayoración de las solicitaciones y los de reducción de capacidades

Tabla 41: Factores de mayoración de las solicitaciones para el estado límite de la falla estructural

Descripción de la solicitación	Casos de carga		
	C1	C2	C3
Solicitaciones permanentes (incluye presión constante y variable de agua)	1.35	1.20	1.00
Solicitaciones permanentes provenientes del empuje de tierras en reposo	1.20	1.10	1.00
Solicitaciones permanentes favorables	1.00	1.00	1.00
Solicitaciones variables (carga viva) desfavorables	1.50	1.30	1.00

Tabla 42: Factores de reducción de resistencias para el estado límite de la falla estructural

Descripción de la resistencia	Casos de carga		
	C1	C2	C3
Resistencia de suelo			
Empuje pasivo y rotura del suelo	1.40	1.30	1.20
Resistencia al deslizamiento	1.10	1.10	1.10
Resistencia de pilotes			
Resistencia a la compresión	1.20	1.20	1.20
Resistencia a la tracción	1.30	1.30	1.30
Resistencia a la compresión y tracción	1.40	1.40	1.40
Resistencia de pilotes inyectados			
Resistencia del elemento metálico	1.15	1.15	1.15
Resistencia del arrancamiento del bulbo	1.10	1.10	1.10

B.3. Capacidad de carga externa

A partir del método de Bustamante (1985) se determina la fricción unitaria última para el tipo de arena en estudio

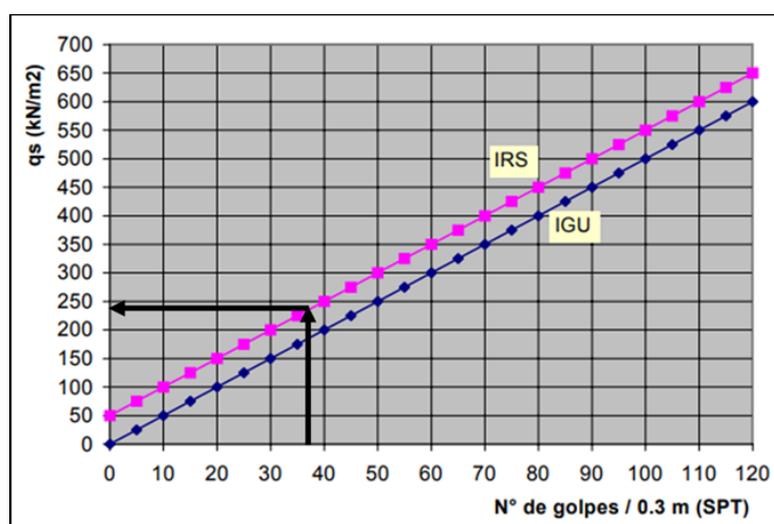


Figura 60: Valor de la fricción unitaria a partir de la correlación propuesta por Bustamante 1985

A continuación, se muestran la capacidad admisible por falla del bulbo y de arrancamiento para los 4 tipos de configuraciones de micropilotes. Además, cada configuración es diseñada para las tres profundidades de estrato licuable a estudiar:

Tabla 43: Capacidad admisible según fricción para configuración A, con 3 metros de estrato licuable

MP	Tipo	β [°]	N_{sol} [kN]	ϕ_b [m]	L_v [m]	L_{ad} [m]	L_v' [m]	N_{adm} [kN]
1	40/16	15	204.7	0.135	3.52	3.11	6.62	539
2	40/16	15	198.9	0.135	3.42	3.11	6.53	531
3	40/16	15	141.7	0.135	2.44	3.11	5.54	451
4	40/16	15	104.8	0.135	1.80	3.11	4.91	400
5	40/16	15	105.7	0.135	1.82	3.11	4.92	401
6	40/16	15	100.1	0.135	1.72	3.11	4.83	393
7	40/16	15	156.5	0.135	2.69	3.11	5.80	472
8	40/16	15	144.7	0.135	2.49	3.11	5.59	455
9	40/16	0	249.6	0.135	4.29	3	7.29	602
10	40/16	0	153.9	0.135	2.65	3	5.65	468
11	40/16	0	147.2	0.135	2.53	3	5.53	459
12	40/16	0	166.5	0.135	2.86	3	5.86	486

Tabla 44: Capacidad admisible según fricción para configuración A, con 5 metros de estrato licuable

MP	Tipo	β [°]	N_{sol} [kN]	ϕ_b [m]	L_v [m]	L_{ad} [m]	L_v' [m]	N_{adm} [kN]
1	40/16	15	204.7	0.135	3.52	5.18	8.70	708
2	40/16	15	198.9	0.135	3.42	5.18	8.60	700
3	40/16	15	141.7	0.135	2.44	5.18	7.61	620
4	40/16	15	104.8	0.135	1.80	5.18	6.98	568
5	40/16	15	105.7	0.135	1.82	5.18	6.99	570
6	40/16	15	100.1	0.135	1.72	5.18	6.90	562
7	40/16	15	156.5	0.135	2.69	5.18	7.87	641
8	40/16	15	144.7	0.135	2.49	5.18	7.66	624
9	40/16	0	249.6	0.135	4.29	5.00	9.29	757
10	40/16	0	153.9	0.135	2.65	5.00	7.65	623
11	40/16	0	147.2	0.135	2.53	5.00	7.53	613
12	40/16	0	166.5	0.135	2.86	5.00	7.86	640

Tabla 45: Capacidad admisible según fricción para configuración A, con 8 metros de estrato licuable

MP	Tipo	β [°]	N_{sol} [kN]	ϕ_b [m]	L_v [m]	L_{ad} [m]	L_v' [m]	N_{adm} [kN]
1	40/16	15	204.7	0.135	3.52	8.28	11.80	961
2	40/16	15	198.9	0.135	3.42	8.28	11.70	953
3	40/16	15	141.7	0.135	2.44	8.28	10.72	873
4	40/16	15	104.8	0.135	1.80	8.28	10.08	821
5	40/16	15	105.7	0.135	1.82	8.28	10.10	822
6	40/16	15	100.1	0.135	1.72	8.28	10.00	815
7	40/16	15	156.5	0.135	2.69	8.28	10.97	894
8	40/16	15	144.7	0.135	2.49	8.28	10.77	877
9	40/16	0	249.6	0.135	4.29	8.00	12.29	1001
10	40/16	0	153.9	0.135	2.65	8.00	10.65	867
11	40/16	0	147.2	0.135	2.53	8.00	10.53	858
12	40/16	0	166.5	0.135	2.86	8.00	10.86	885

Tabla 46: Capacidad admisible según fricción para configuración de B, con 3 metros de estrato licuable

MP	Tipo	β [°]	N_{sol} [kN]	ϕ_b [m]	L_v [m]	L_{ad} [m]	L_v' [m]	N_{adm} [kN]
1	52/26	45	205.1	0.1725	2.76	4.24	7.00	729
2	52/26	45	199.9	0.1725	2.69	4.24	6.93	721
3	52/26	45	182.7	0.1725	2.46	4.24	6.70	697
4	52/26	45	72.8	0.1725	0.98	4.24	5.22	543
5	52/26	45	100.9	0.1725	1.36	4.24	5.60	583
6	52/26	45	95.8	0.1725	1.29	4.24	5.53	576
7	52/26	45	83.6	0.1725	1.12	4.24	5.37	558
8	52/26	45	177.6	0.1725	2.39	4.24	6.63	690
9	52/26	0	385.0	0.1725	5.18	3.00	8.18	851
10	52/26	0	233.8	0.1725	3.15	3.00	6.15	639
11	52/26	0	236.5	0.1725	3.18	3.00	6.18	643
12	52/26	0	263.6	0.1725	3.55	3.00	6.55	681

Tabla 47: Capacidad admisible según fricción para configuración B, con 5 metros de estrato licuable

MP	Tipo	β [°]	N_{sol} [kN]	ϕ_b [m]	L_v [m]	L_{ad} [m]	L_v' [m]	N_{adm} [kN]
1	52/26	45	205.1	0.1725	2.76	7.07	9.83	1023
2	52/26	45	199.9	0.1725	2.69	7.07	9.76	1016
3	52/26	45	182.7	0.1725	2.46	7.07	9.53	991
4	52/26	45	72.8	0.1725	0.98	7.07	8.05	838
5	52/26	45	100.9	0.1725	1.36	7.07	8.43	877
6	52/26	45	95.8	0.1725	1.29	7.07	8.36	870
7	52/26	45	83.6	0.1725	1.12	7.07	8.20	853
8	52/26	45	177.6	0.1725	2.39	7.07	9.46	984
9	52/26	0	385.0	0.1725	5.18	5.00	10.18	1059
10	52/26	0	233.8	0.1725	3.15	5.00	8.15	848
11	52/26	0	236.5	0.1725	3.18	5.00	8.18	851
12	52/26	0	263.6	0.1725	3.55	5.00	8.55	889

Tabla 48: Capacidad admisible según fricción para configuración B, con 8 metros de estrato licuable

MP	Tipo	β [°]	N_{sol} [kN]	ϕ_b [m]	L_v [m]	L_{ad} [m]	L_v' [m]	N_{adm} [kN]
1	52/26	45	205.1	0.1725	2.76	11.31	14.07	1464
2	52/26	45	199.9	0.1725	2.69	11.31	14.00	1457
3	52/26	45	182.7	0.1725	2.46	11.31	13.77	1433
4	52/26	45	72.8	0.1725	0.98	11.31	12.29	1279
5	52/26	45	100.9	0.1725	1.36	11.31	12.67	1318
6	52/26	45	95.8	0.1725	1.29	11.31	12.60	1311
7	52/26	45	83.6	0.1725	1.12	11.31	12.44	1294
8	52/26	45	177.6	0.1725	2.39	11.31	13.70	1426
9	52/26	0	385.0	0.1725	5.18	8.00	13.18	1371
10	52/26	0	233.8	0.1725	3.15	8.00	11.15	1160
11	52/26	0	236.5	0.1725	3.18	8.00	11.18	1163
12	52/26	0	263.6	0.1725	3.55	8.00	11.55	1201

Tabla 49: Capacidad admisible según fricción para configuración C, con 3 metros de estrato licuable

MP	Tipo	β [°]	N_{sol} [kN]	ϕ_b [m]	L_v [m]	L_{ad} [m]	L_v' [m]	N_{adm} [kN]
1	40/16	15	177.3	0.135	3.05	3.11	6.15	501
2	40/16	15	171.3	0.135	2.95	3.11	6.05	493
3	40/16	15	136.3	0.135	2.34	3.11	5.45	444
4	40/16	15	61.2	0.135	1.05	3.11	4.16	339
5	40/16	15	102.2	0.135	1.76	3.11	4.86	396
6	40/16	15	96.9	0.135	1.67	3.11	4.77	389
7	40/16	15	96.0	0.135	1.65	3.11	4.76	387
8	40/16	15	131.4	0.135	2.26	3.11	5.36	437
9	40/16	0	268.5	0.135	4.62	3.00	7.62	620
10	40/16	0	157.7	0.135	2.71	3.00	5.71	465
11	40/16	0	190.6	0.135	3.28	3.00	6.28	511
12	40/16	0	172.4	0.135	2.96	3.00	5.96	486
13	40/16	15	98.6	0.135	1.69	3.11	4.80	391
14	40/16	15	23.8	0.135	0.41	3.11	3.52	286
15	40/16	15	98.4	0.135	1.69	3.11	4.80	391
16	40/16	15	36.6	0.135	0.63	3.11	3.74	304

Tabla 50: Capacidad admisible según fricción para configuración C, con 5 metros de estrato licuable

MP	Tipo	β [°]	N_{sol} [kN]	ϕ_b [m]	L_v [m]	L_{ad} [m]	L_v' [m]	N_{adm} [kN]
1	40/16	15	177.3	0.135	3.05	5.18	8.23	670
2	40/16	15	171.3	0.135	2.95	5.18	8.12	661
3	40/16	15	136.3	0.135	2.34	5.18	7.52	612
4	40/16	15	61.2	0.135	1.05	5.18	6.23	507
5	40/16	15	102.2	0.135	1.76	5.18	6.93	565
6	40/16	15	96.9	0.135	1.67	5.18	6.84	557
7	40/16	15	96.0	0.135	1.65	5.18	6.83	556
8	40/16	15	131.4	0.135	2.26	5.18	7.44	605
9	40/16	0	268.5	0.135	4.62	5.00	9.62	783
10	40/16	0	157.7	0.135	2.71	5.00	7.71	628
11	40/16	0	190.6	0.135	3.28	5.00	8.28	674
12	40/16	0	172.4	0.135	2.96	5.00	7.96	648
13	40/16	15	98.6	0.135	1.69	5.18	6.87	560
14	40/16	15	23.8	0.135	0.41	5.18	5.59	455
15	40/16	15	98.4	0.135	1.69	5.18	6.87	559
16	40/16	15	36.6	0.135	0.63	5.18	5.81	473

Tabla 51: Capacidad admisible según fricción para configuración C, con 8 metros de estrato licuable

MP	Tipo	β [°]	N_{sol} [kN]	ϕ_b [m]	L_v [m]	L_{ad} [m]	L_v' [m]	N_{adm} [kN]
1	40/16	15	177.3	0.135	3.05	8.28	11.33	923
2	40/16	15	171.3	0.135	2.95	8.28	11.23	914
3	40/16	15	136.3	0.135	2.34	8.28	10.63	865
4	40/16	15	61.2	0.135	1.05	8.28	9.33	760
5	40/16	15	102.2	0.135	1.76	8.28	10.04	817
6	40/16	15	96.9	0.135	1.67	8.28	9.95	810
7	40/16	15	96.0	0.135	1.65	8.28	9.93	809
8	40/16	15	131.4	0.135	2.26	8.28	10.54	858
9	40/16	0	268.5	0.135	4.62	8.00	12.62	1027
10	40/16	0	157.7	0.135	2.71	8.00	10.71	872
11	40/16	0	190.6	0.135	3.28	8.00	11.28	918
12	40/16	0	172.4	0.135	2.96	8.00	10.96	893
13	40/16	15	98.6	0.135	1.69	8.28	9.98	812
14	40/16	15	23.8	0.135	0.41	8.28	8.69	708
15	40/16	15	98.4	0.135	1.69	8.28	9.97	812
16	40/16	15	36.6	0.135	0.63	8.28	8.91	726

Tabla 52: Capacidad admisible según fricción para configuración D, con 3 metros de estrato licuable

MP	Tipo	β [°]	N_{sol} [kN]	ϕ_b [m]	L_v [m]	L_{ad} [m]	L_v' [m]	N_{adm} [kN]
1	40/16	45	177.9	0.135	3.06	4.24	7.30	595
2	40/16	45	173.3	0.135	2.98	4.24	7.22	588
3	40/16	45	163.1	0.135	2.80	4.24	7.05	574
4	40/16	45	74.6	0.135	1.28	4.24	5.52	450
5	40/16	45	94.4	0.135	1.62	4.24	5.87	478
6	40/16	45	90.0	0.135	1.55	4.24	5.79	471
7	40/16	45	79.0	0.135	1.36	4.24	5.60	456
8	40/16	45	158.7	0.135	2.73	4.24	6.97	568
9	52/26	0	398.4	0.1725	5.36	3.00	8.36	870
10	52/26	0	233.5	0.1725	3.14	3.00	6.14	639
11	52/26	0	279.3	0.1725	3.76	3.00	6.76	703
12	52/26	0	266.4	0.1725	3.58	3.00	6.58	685
13	40/16	45	64.1	0.135	1.10	4.24	5.34	435
14	40/16	45	34.4	0.135	0.59	4.24	4.83	394
15	40/16	45	63.9	0.135	1.10	4.24	5.34	435
16	40/16	45	40.9	0.135	0.70	4.24	4.95	403

Tabla 53: Capacidad admisible según fricción para configuración D, con 5 metros de estrato licuable

MP	Tipo	β [°]	N_{sol} [kN]	ϕ_b [m]	L_v [m]	L_{ad} [m]	L_v' [m]	N_{adm} [kN]
1	40/16	45	177.9	0.135	3.06	7.07	10.13	825
2	40/16	45	173.3	0.135	2.98	7.07	10.05	818
3	40/16	45	163.1	0.135	2.80	7.07	9.88	804
4	40/16	45	74.6	0.135	1.28	7.07	8.35	680
5	40/16	45	94.4	0.135	1.62	7.07	8.69	708
6	40/16	45	90.0	0.135	1.55	7.07	8.62	702
7	40/16	45	79.0	0.135	1.36	7.07	8.43	686
8	40/16	45	158.7	0.135	2.73	7.07	9.80	798
9	52/26	0	398.4	0.1725	5.36	5.00	10.36	1078
10	52/26	0	233.5	0.1725	3.14	5.00	8.14	847
11	52/26	0	279.3	0.1725	3.76	5.00	8.76	911
12	52/26	0	266.4	0.1725	3.58	5.00	8.58	893
13	40/16	45	64.1	0.135	1.10	7.07	8.17	665
14	40/16	45	34.4	0.135	0.59	7.07	7.66	624
15	40/16	45	63.9	0.135	1.10	7.07	8.17	665
16	40/16	45	40.9	0.135	0.70	7.07	7.77	633

Tabla 54: Capacidad admisible según fricción para configuración D, con 8 metros de estrato licuable

MP	Tipo	β [°]	N_{sol} [kN]	ϕ_b [m]	L_v [m]	L_{ad} [m]	L_v' [m]	N_{adm} [kN]
1	40/16	45	177.9	0.135	3.06	11.31	14.37	1170
2	40/16	45	173.3	0.135	2.98	11.31	14.29	1164
3	40/16	45	163.1	0.135	2.80	11.31	14.12	1150
4	40/16	45	74.6	0.135	1.28	11.31	12.60	1026
5	40/16	45	94.4	0.135	1.62	11.31	12.94	1053
6	40/16	45	90.0	0.135	1.55	11.31	12.86	1047
7	40/16	45	79.0	0.135	1.36	11.31	12.67	1032
8	40/16	45	158.7	0.135	2.73	11.31	14.04	1143
9	52/26	0	398.4	0.1725	5.36	8.00	13.36	1390
10	52/26	0	233.5	0.1725	3.14	8.00	11.14	1159
11	52/26	0	279.3	0.1725	3.76	8.00	11.76	1223
12	52/26	0	266.4	0.1725	3.58	8.00	11.58	1205
13	40/16	45	64.1	0.135	1.10	11.31	12.41	1011
14	40/16	45	34.4	0.135	0.59	11.31	11.91	969
15	40/16	45	63.9	0.135	1.10	11.31	12.41	1011
16	40/16	45	40.9	0.135	0.70	11.31	12.02	979

La capacidad admisible por arrancamiento solo debe ser analizada si se observan cargas a tracción en elemento, por lo que a continuación, si bien se presentan las cargas de todos los elementos, solo deben ser considerados aquellos que posean un valor T [kN] positivo (caso tracción)

Tabla 55: Capacidad admisible por arrancamiento para caso mínimo en configuración A

MP	Tipo	β [°]	T [kN]	L_v^3 [m]	L_v [m]	Lo [m]	N_{adm} [kN]
1	40/16	15	-132.5	-131	-5.1	9	738
2	40/16	15	-127.2	-126	-5.0	9	738
3	40/16	15	59.8	59	3.9	9	738
4	40/16	15	47.8	47	3.6	9	738
5	40/16	15	105.7	104	4.7	9	738
6	40/16	15	100.1	99	4.6	9	738
7	40/16	15	42.9	42	3.5	9	738
8	40/16	15	5.9	6	1.8	9	738
9	40/16	0	-158.6	-151	-5.3	9	765
10	40/16	0	66.2	63	4.0	9	765
11	40/16	0	147.2	140	5.2	9	765
12	40/16	0	51.4	49	3.6	9	765

Tabla 56: Capacidad admisible por arrancamiento para caso mínimo en configuración B

MP	Tipo	β [°]	T [kN]	L_v^3 [m]	L_v [m]	Lo [m]	N_{adm} [kN]
1	52/26	45	-83.6	-126.5	-5.0	10.5	765
2	52/26	45	-92.5	-140	-5.2	10.5	765
3	52/26	45	-17.8	-26.92	-3.0	10.5	765
4	52/26	45	72.8	110.11	4.8	10.5	765
5	52/26	45	100.9	152.6	5.3	10.5	765
6	52/26	45	95.8	144.94	5.3	10.5	765
7	52/26	45	77.8	117.78	4.9	10.5	765
8	52/26	45	-45.9	-69.48	-4.1	10.5	765
9	52/26	0	-249.2	-377.1	-7.2	10.5	1082
10	52/26	0	118.9	179.96	5.6	10.5	1082
11	52/26	0	236.5	357.77	7.1	10.5	1082
12	52/26	0	85.2	128.98	5.1	10.5	1082

Tabla 57: Capacidad admisible por arrancamiento para caso mínimo en configuración C

MP	Tipo	β [°]	T [kN]	L_v^3 [m]	L_v [m]	Lo [m]	N_{adm} [kN]
1	40/16	15	-96.0	-106.4	-4.7	9	658
2	40/16	15	-94.3	-104.4	-4.9	9	658
3	40/16	15	23.0	25.467	2.9	9	658
4	40/16	15	56.1	62.153	3.9	9	658
5	40/16	15	102.2	113.17	4.8	9	658
6	40/16	15	96.9	107.32	4.7	9	658
7	40/16	15	61.3	67.945	4.0	9	658
8	40/16	15	-9.9	-10.96	-2.2	9	658
9	40/16	0	-166.7	-178.3	-5.6	9	681
10	40/16	0	96.5	103.23	4.6	9	681
11	40/16	0	190.6	203.96	5.8	9	681
12	40/16	0	79.8	85.414	4.4	9	681
13	40/16	15	-44.2	-48.93	-3.6	9	658
14	40/16	15	23.8	26.414	2.9	9	658
15	40/16	15	-36.6	-40.58	-3.4	9	658
16	40/16	15	23.7	26.272	2.9	9	658

Tabla 58: Capacidad admisible por arrancamiento para caso mínimo en configuración D

MP	Tipo	β [°]	T [kN]	L_v^3 [m]	L_v [m]	Lo [m]	N_{adm} [kN]
1	40/16	45	-62.3	-94.3	-4.5	9	482
2	40/16	45	-73.8	-111.6	-4.8	9	482
3	40/16	45	-18.6	-28.13	-3.0	9	482
4	40/16	45	74.6	112.82	4.8	9	482
5	40/16	45	94.4	142.87	5.2	9	482
6	40/16	45	90.0	136.18	5.1	9	482
7	40/16	45	79.0	119.59	4.9	9	482
8	40/16	45	-42.9	-64.86	-4.0	9	482
9	52/26	0	-254.5	-385.1	-7.2	12	1615
10	52/26	0	150.5	227.65	6.1	12	1615
11	52/26	0	279.3	422.51	7.5	12	1615
12	52/26	0	114.2	172.83	5.5	12	1615
13	40/16	45	-38.7	-58.56	-3.8	9	482
14	40/17	45	-17.7	-26.85	-2.9	9	482
15	40/18	45	-38.7	-58.49	-3.8	9	482
16	40/19	45	-17.8	-26.87	-2.9	9	482

Al largo de los micropilotes que se obtienen por diseño, se le agrega un largo que varía entre 5 a 6 metros por caso, debido a que se desconocen las cargas que el suelo ejercería en el elemento al licuar, por lo que el largo se adiciona con el fin de generar una mayor resistencia de fuste en el estrato competente. De esta forma, para un estrato licuable de 3 metros, los largos por configuración varían entre los 9 y 12 metros. Para un estrato licuable de 5 metros, el largo varía entre 12 y 15 metros. Y finalmente, para el caso de 8 metros licuables, el largo varía entre los 15 y 18 metros por configuración. Cabe destacar que la variación entre configuraciones es debido a los distintos largos que entregan por diseño cada configuración

ANEXO C: ESFUERZOS EN LOS MICROPILOTES POR PLAXIS 3D

Las solicitaciones entregadas por PLAXIS 3D para cada configuración de micropilotes se detallan a continuación. Los micropilotes que se encuentran resaltado con diferente color corresponden a los elementos verticales de cada caso:

Tabla 59: Solicitaciones en los micropilotes para la configuración D dadas por PLAXIS 3D. Profundidad de estrato licuable de 3 metros

MP	Perno	N [kN]		q ₁₂ [kN]		q ₁₃ [kN]		M2 [kN*m]		M3 [kN*m]	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	40/16	-1759	1288	-58	92	-106	106	-32	26	-13	12
2	40/16	-305	274	-350	292	-48	61	-12	9	-83	62
3	40/16	-1325	1312	-1325	1312	-206,8	176	-27	23	-13	14
4	40/16	-357	-251	-344	479	-39	134	-7	14	-72	48
5	40/16	-1237	999	-91	86	-103	101	-16	10	-15	15
6	40/16	-280	292	-202	296	-39	47	-4	8	-43	84
7	40/16	-1282	1239	-50	43	-84	95	-25	28	-14	7
8	40/16	-212	236	-376	406	-56	40	-5	13	-54	79
9	52/26	-447	120	-315	306	-180	135	-22	14	-71	65
10	52/26	-350	146	-283	306	-136	133	-23	21	-59	51
11	52/26	-398	215	-214	244	-133	106	-20	15	-41	59
12	52/26	-401	232	-167	219	-94	62	-12	17	-31	41
13	40/16	-1448	1254	-43	63	-86	117	-27	21	-8	7
14	40/16	-1347	1464	-73	70	-98	103	-23	22	-17	16
15	40/16	-128	179	-339	288	-51	127	-15	14	-78	59
16	40/16	-99	80	-211	216	-54	68	-7	18	-44	85

**Tabla 60: Solicitaciones en los micropilotes para la configuración D dadas por PLAXIS 3D.
Profundidad de estrato licuable de 5 metros**

MP	Perno	N [kN]		q ₁₂ [kN]		q ₁₃ [kN]		M2 [kN*m]		M3 [kN*m]	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	40/16	-2021	2078	-92	128	-219	226	-39	54	-26	15
2	40/16	-356	170	-380	396	-67	84	-5	15	-52	70
3	40/16	-1846	1830	-93	100	-194	197	-51	27	-9	13
4	40/16	-221	209	-417	409	-51	60	-3	11	-49	79
5	40/16	-1765	1794	-109	94	-197	182	-54	27	-16	16
6	40/16	-334	185	-459	466	-105	62	-22	13	-90	48
7	40/16	-2149	2143	-97	88	-84	81	-36	47	-14	22
8	40/16	-284	163	-479	654	-114	103	-15	10	-111	55
9	52/26	-363	110	-610	480	-112	89	-25	21	-49	122
10	52/26	-516	173	-489	385	-99	83	-18	13	-76	133
11	52/26	-362	127	-259	290	-180	369	-23	41	-69	69
12	52/26	-346	179	-212	267	-165	83	-20	13	-51	57
13	40/16	-1686	1621	-70	97	-197	288	-40	60	-17	14
14	40/16	-1443	1413	-154	107	-184	228	-56	28	-22	23
15	40/16	-222	210	-542	382	-162	80	-12	9	-60	88
16	40/16	-211	187	-382	648	-103	76	-22	13	-100	54

**Tabla 61: Solicitaciones en los micropilotes para la configuración D dadas por PLAXIS 3D.
Profundidad de estrato licuable de 8 metros**

MP	Perno	N [kN]		q ₁₂ [kN]		q ₁₃ [kN]		M2 [kN*m]		M3 [kN*m]	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	40/16	-2059	1975	-121	112	-186	161	-33	20	-13	28
2	40/16	-278	167	-544	349	-42	150	-15	12	-73	44
3	40/16	-1893	1913	-83	93	-144	119	-29	41	-10	13
4	40/16	-354	141	-437	256	-102	74	-17	17	-63	42
5	40/16	-1366	1647	-110	86	-177	193	-26	33	-12	15
6	40/16	-320	252	-312	633	-70	77	-12	10	-40	106
7	40/16	-1511	1647	-135	115	-141	156	-29	21	-17	21
8	40/16	-218	226	-354	652	-218	96	-218	96	-33	95
9	52/26	-368	387	-563	526	-60	94	-21	16	-183	125
10	52/26	-409	263	-544	522	-122	118	-22	14	-183	112
11	52/26	-493	457	-255	400	-122	169	-23	34	-180	116
12	52/26	-402	193	-667	624	-72	113	-20	22	-178	115
13	40/16	-1500	1743	-117	74	-171	155	-33	21	-12	29
14	40/16	-1344	1381	-71	73	-117	116	-27	38	-12	13
15	40/16	-255	133	-534	318	-85	98	-16	12	-78	45
16	40/16	-307	130	-267	668	-42	69	-14	14	-22	98

**Tabla 62: Solicitaciones en los micropilotes para la configuración C dadas por PLAXIS 3D.
Profundidad de estrato licuable de 3 metros**

MP	Perno	N [kN]		q ₁₂ [kN]		q ₁₃ [kN]		M2 [kN*m]		M3 [kN*m]	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	40/16	-1763	1583	-91	88	-385	439	-81	60	-13	13
2	40/16	-264	402	-396	398	-105	79	-19	11	-74	62
3	40/16	-1495	1908	-82	103	-393	312	-65	53	-16	12
4	40/16	-414	295	-369	364	-80	-70	-15	15	-64	60
5	40/16	-1512	2039	-50	74	-424	416	-72	75	-14	12
6	40/16	-521	310	-469	452	-67	53	-14	10	-70	75
7	40/16	-1848	1903	-60	66	-375	487	-72	70	-16	10
8	40/16	-291	525	-515	490	-79	44	-7	12	-76	85
9	40/16	-813	666	-352	417	-126	81	-16	14	-71	53
10	40/16	-942	614	-379	440	-114	53	-15	10	-55	59
11	40/16	-1011	529	-388	418	-43	80	-10	10	-82	67
12	40/16	-900	713	-348	271	-110	143	-14	18	-51	50
13	40/16	-1629	1733	-123	185	-561	1183	-69	79	-17	11
14	40/16	-1532	1926	-70	82	-461	442	-67	67	-10	13
15	40/16	-130	94	-394	473	-45	76	-8	6	-81	65
16	40/16	-134	69	-1727	2179	-199	98	-8	12	-97	108

**Tabla 63: Solicitaciones en los micropilotes para la configuración C dadas por PLAXIS 3D.
Profundidad de estrato licuable de 5 metros**

MP	Perno	N [kN]		q ₁₂ [kN]		q ₁₃ [kN]		M2 [kN*m]		M3 [kN*m]	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	40/16	-1359	1545	-193	388	-961	1164	-73	95	-20	20
2	40/16	-477	263	-413	335	-136	68	-11	12	-78	102
3	40/16	-1745	1620	-53	81	-355	344	-101	72	-15	8
4	40/16	-355	280	-296	276	-90	50	-10	15	-44	50
5	40/16	-1746	1541	-109	80	-223	264	-89	67	-15	24
6	40/16	-446	458	-1624	663	-323	315	-13	14	-78	87
7	40/16	-1411	1660	-61	69	-487	443	-74	89	-12	13
8	40/16	-439	227	-293	260	-94	75	-13	10	-77	68
9	40/16	-685	454	-340	325	-70	56	-12	10	-77	96
10	40/16	-539	669	-719	878	-70	97	-7	13	-79	77
11	40/16	-621	693	-295	287	-82	113	-13	12	-67	64
12	40/16	-614	394	-403	409	-120	103	-27	23	-74	81
13	40/16	-1318	1457	-102	90	-332	405	-67	81	-12	17
14	40/16	-1769	1578	-56	103	-284	314	-99	70	-14	9
15	40/16	-258	163	-306	320	-49	60	-9	10	-63	81
16	40/16	-226	242	-475	429	-70	107	-7	12	-85	76

**Tabla 64: Solicitaciones en los micropilotes para la configuración C dadas por PLAXIS 3D.
Profundidad de estrato licuable de 8 metros**

MP	Perno	N [kN]		q ₁₂ [kN]		q ₁₃ [kN]		M2 [kN*m]		M3 [kN*m]	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	40/16	-1226	1296	-62	64	-470	470	-65	67	-12	13
2	40/16	-470	327	-479	408	-93	85	-18	7	-109	81
3	40/16	-1874	1419	-46	59	-457	489	-89	79	-15	9
4	40/16	-335	333	-542	521	-66	70	-17	6	-93	78
5	40/16	-1415	1031	-82	115	-589	498	-76	95	-20	6
6	40/16	-471	420	-534	520	-41	72	-12	6	-91	114
7	40/16	-1208	1316	-108	88	-424	461	-63	59	-17	13
8	40/16	-524	382	-267	315	-34	92	-5	13	-88	124
9	40/16	-654	529	-536	553	-56	52	-14	12	-71	90
10	40/16	-474	389	-337	382	-46	49	-5	10	-69	93
11	40/16	-411	336	-508	541	-51	71	-12	11	-76	77
12	40/16	-439	417	-517	432	-103	90	-18	12	-62	73
13	40/16	-1206	1349	-108	138	-616	563	-87	77	-13	11
14	40/16	-1789	1372	-68	93	-426	416	-93	87	-20	6
15	40/16	-274	149	-457	430	-49	38	-20	8	-107	83
16	40/16	-197	157	-190	213	-33	55	-5	11	-77	114

**Tabla 65: Solicitaciones en los micropilotes para la configuración B dadas por PLAXIS 3D.
Profundidad de estrato licuable de 3 metros**

MP	Perno	N [kN]		q ₁₂ [kN]		q ₁₃ [kN]		M2 [kN*m]		M3 [kN*m]	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	52/26	-2575	2530	-84	70	-246	239	-72	42	-17	14
2	52/26	-367	400	-362	359	-83	152	-28	20	-161	85
3	52/26	-2591	2489	-209	178	-222	190	-47	66	-26	26
4	52/26	-371	281	-760	826	-210	226	-23	14	-134	96
5	52/26	-2282	2530	-97	122	-270	214	-38	60	-26	28
6	52/26	-318	359	-329	356	-109	60	-12	17	-90	158
7	52/26	-2448	2278	-290	202	-242	174	-80	38	-47	32
8	52/26	-199	284	-554	576	-132	55	-23	17	-90	127
9	52/26	-391	156	-300	301	-84	98	-14	14	-77	56
10	52/26	-475	264	-142	382	-150	220	-18	11	-82	38
11	52/26	-395	138	-276	269	-139	89	-30	17	-94	42
12	52/26	-388	174	-254	365	-256	76	-28	11	-76	58

**Tabla 66: Solicitaciones en los micropilotes para la configuración B dadas por PLAXIS 3D.
Profundidad de estrato licuable de 5 metros**

MP	Perno	N [kN]		q ₁₂ [kN]		q ₁₃ [kN]		M2 [kN*m]		M3 [kN*m]	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	52/26	-2758	2882	-276	203	-266	331	-44	65	-36	28
2	52/26	-264	227	-704	840	-112	95	-16	16	-124	157
3	52/26	-2741	2879	-124	126	-302	283	-56	58	-20	17
4	52/26	-498	172	-695	736	-108	130	-17	17	-115	146
5	52/26	-2630	2705	-107	106	-420	306	-77	65	-20	28
6	52/26	-320	137	-935	758	-176	68	-17	17	-160	132
7	52/26	-2424	2552	-47	58	-162	198	-50	66	-17	14
8	52/26	-280	241	-626	588	-82	102	-12	24	-122	96
9	52/26	-395	236	-406	392	-119	206	-19	36	-96	96
10	52/26	-397	266	-442	398	-118	110	-16	29	-108	92
11	52/26	-544	311	-386	436	-103	97	-13	25	-89	71
12	52/26	-467	212	-391	438	-106	118	-14	31	-78	80

**Tabla 67: Solicitaciones en los micropilotes para la configuración B dadas por PLAXIS 3D.
Profundidad de estrato licuable de 8 metros**

MP	Perno	N [kN]		q ₁₂ [kN]		q ₁₃ [kN]		M2 [kN*m]		M3 [kN*m]	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	52/26	-3192	3392	-100	102	-270	334	-86	50	-17	38
2	52/26	-474	268	-1060	1208	-186	190	-22	43	-194	164
3	52/26	-2747	2618	-155	234	-264	227	-65	52	-26	19
4	52/26	-427	352	-575	704	-140	205	-20	38	-115	97
5	52/26	-2830	2808	-162	192	-326	383	-49	71	-26	12
6	52/26	-632	286	-716	638	-126	160	-28	18	-89	139
7	52/26	-2489	2926	-102	160	-440	503	-94	52	-24	17
8	52/26	-577	356	-2292	2303	-337	283	-25	46	-133	211
9	52/26	-433	212	-410	394	-80	112	-12	18	-109	130
10	52/26	-342	252	-373	431	-88	50	-24	5	-114	115
11	52/26	-420	434	-517	619	-430	274	-54	28	-103	119
12	52/26	-515	204	-581	664	-60	126	-22	19	-107	128

**Tabla 68: Solicitaciones en los micropilotes para la configuración A dadas por PLAXIS 3D.
Profundidad de estrato licuable de 3 metros**

MP	Perno	N [kN]		q ₁₂ [kN]		q ₁₃ [kN]		M2 [kN*m]		M3 [kN*m]	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	40/16	-2576	2210	-243	186	-450	371	-120	93	-13	27
2	40/16	-418	581	-466	464	-205	112	-21	16	-126	110
3	40/16	-2429	2736	-365	456	-651	653	-101	107	-22	42
4	40/16	-677	331	-432	419	-213	176	-29	22	-75	66
5	40/16	-2390	2930	-174	88	-392	384	-99	101	-8	29
6	40/16	-691	278	-582	581	-93	62	-16	6	-96	112
7	40/16	-2869	2608	157	-104	-482	445	-93	69	-21	19
8	40/16	-610	602	-544	533	-86	115	-16	16	-80	91
9	40/16	-699	909	-502	520	-99	75	-14	8	-118	99
10	40/16	-1027	405	-2288	710	-290	126	-48	10	-102	101
11	40/16	-992	530	-528	536	-123	120	-6	16	-102	96
12	40/16	-731	1088	-797	662	-67	96	-6	14	-91	85

**Tabla 69: Solicitaciones en los micropilotes para la configuración A dadas por PLAXIS 3D.
Profundidad de estrato licuable de 5 metros**

MP	Perno	N [kN]		q ₁₂ [kN]		q ₁₃ [kN]		M2 [kN*m]		M3 [kN*m]	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	40/16	-2102	2318	-160	152	-736	686	-118	85	-22	26
2	40/16	-574	416	-296	608	-189	107	-27	19	-101	130
3	40/16	-2062	1878	-178	165	-549	674	-96	77	-29	19
4	40/16	-272	384	-608	850	-149	102	-21	6	-99	139
5	40/16	-2224	1914	-86	106	-594	808	-109	75	-16	11
6	40/16	-421	451	-453	534	-75	72	-26	14	-130	80
7	40/16	-2190	2509	-72	90	-1040	810	-102	154	-13	13
8	40/16	-557	376	-797	1013	-77	88	-14	14	-144	93
9	40/16	-805	549	-418	533	-51	69	-18	16	-96	155
10	40/16	-475	443	-469	405	-114	85	-26	13	-93	131
11	40/16	-482	515	-414	629	-101	94	-19	13	-93	152
12	40/16	-792	450	-744	651	-98	104	-19	24	-96	138

**Tabla 70: Solicitaciones en los micropilotes para la configuración A dadas por PLAXIS 3D.
Profundidad de estrato licuable de 8 metros**

MP	Perno	N [kN]		q ₁₂ [kN]		q ₁₃ [kN]		M2 [kN*m]		M3 [kN*m]	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	40/16	-1549	1619	-70	85	-590	530	-104	118	-11	3
2	40/16	-475	310	-694	682	-58	51	-11	10	-50	48
3	40/16	-1858	1302	-72	72	-595	442	-133	99	-11	8
4	40/16	-408	374	-760	750	-75	82	-10	11	-110	110
5	40/16	-2374	1595	-144	120	-534	558	-128	101	-16	16
6	40/16	-394	272	-755	642	-67	83	-8	6	-117	91
7	40/16	-1403	1611	-62	66	-363	512	-99	125	-13	6
8	40/16	-512	269	-587	595	-45	48	-6	6	-115	91
9	40/16	-558	330	-616	610	-50	64	-8	10	-114	123
10	40/16	-406	267	-709	755	-32	40	-6	6	-107	118
11	40/16	-400	490	-982	685	-104	88	-13	11	-102	130
12	40/16	-547	328	-605	600	-101	82	-11	8	-122	109

ANEXO D: DISEÑO DE PILOTE

Para el diseño de pilote, se consideró una zapata de 2 metros de ancho por 2 metros de largo, con una altura de 1.35 metros. A las reacciones basales se le agrega el peso de la fundación, la cual corresponde a hormigón armado cuyo peso específico es de 25 kN/m³. Además, al momento en la base de la estructura, se le debe incluir el efecto que genera el esfuerzo de corte a nivel de sello de fundación, ejerciendo una sollicitación mayor.

Tabla 71: Cargas de diseño para pilote

Cargas de diseño		
N [kN]	Q [kN]	M [kN·m]
-635	-98	-920

Este sistema de fundación consta de una zapata que se encuentra soportada por pilotes pre-excavados de hormigón armado. Al no encontrar roca mediante los ensayos SPT, el pilote desarrolla su resistencia en el estrato de arena competente.

Para el diseño se consideran factores de seguridad global, es decir, se realizan análisis de cargas en términos admisibles. Las cargas utilizadas corresponden a sollicitaciones de carácter dinámico. Por lo tanto, el factor de seguridad a considerar debido a la presencia de sismo es 1.5.

El pilote para diseñar posee un diámetro de 0.88 m. Los parámetros resistentes se encuentran en función de la resistencia de fuste y de punta. Estos valores se derivan según las recomendaciones de la norma DIN 4014 o de la EA Phähle 2013, y del documento FHWA "Drilled Shafts" (O'Neil & Reese, 1999).

La referencia DIN 4014 es actualizada por la EA Phähle 2013, correspondiente a las recomendaciones en pilotaje de la sociedad alemana de Geotecnia, las que entregan las siguientes tablas de diseños (Tabla 61, Tabla 62 y Tabla 63) para la determinación de la resistencia de un pilote fundado en suelos granulares o cohesivos, según la resistencia de punta o de fuste. Además, el mismo documento incluye una recomendación para transformar la medición de SPT a CPT en arenas:

$$q_u = \alpha \cdot N_{30} \left(\frac{MN}{m^2} \right) \quad (65)$$

En donde el factor α se obtiene de la siguiente tabla:

Tabla 72: Factores de conversión para ensayos de penetración estándar (Fuente: DIN 4014)

Tipo de suelo	Factor de conversión α
Arenas finas a medias o ligeramente limosas	0.3
Arenas y arenas ligeramente gravosas	0.5
Arenas bien graduadas	0.5
Gravas y gravas arenosas	0.8

Al analizar los estratos que se poseen, los cuales poseen a suelos granulares, se obtiene la equivalencia en CPT para la arena licuable y competente, cuyos NSPT son 13 y 37 respectivamente. Así, se tienen valores de 3.9 y 10.8 MN/m² para cada caso.

Una vez conseguido estos valores, se utilizan para el diseño, las resistencias indicadas en las siguientes tablas:

Tabla 73: Tabla para la determinación de la capacidad por punta de los pilotes en suelos granulares (Fuente: EA Phähle 2013)

Deformación/Diámetro pilote s/D	Resistencia característica por punta q_b [MN/m ²]		
	CPT = 7.5	CPT = 15	CPT = 25
0.02	0.55	1.05	1.75
0.03	0.7	1.35	2.25
0.1	1.6	3	4

Tabla 74: Tabla para la determinación de la capacidad por fuste de los pilotes en suelos granulares (Fuente: EA Phähle 2013)

q_c [MN/m ²]	Resistencia última característica por fuste q_s [MN/m ²]	Compacidad
7.5	0.055	Media
15	0.105	Alta
>25	0.13	Muy alta

Con las tablas anteriores, es posible obtener una resistencia según la deformación en la parte superior del pilote "s" (en el cabezal) dada según su relación con el diámetro del pilote D. Con esto se puede conseguir la curva de carga-deformación de diseño para un pilote de acuerdo con la norma DIN 4014 o la EA Phähle 2013. Esta curva se calcula en función del asentamiento, y se determina según lo siguiente:

$$Q(s) = Q_s(s) + Q_{rg}(s) = A_s \cdot q_b(s) + \sum A_{mi} \cdot q_s(s) \quad (66)$$

En donde:

$Qs(s)$: Resistencia por punta en función del asentamiento [MN]

$Qrg(s)$: Resistencia por fuste en función del asentamiento [MN]

A_s : Area de la base del pilote [m²]

A_{mi} : Area de fuste en el estrato i [m²]

$qs(s)$: Resistencia última de fuste del estrato i [Mn/m²]

$qb(s)$: Resistencia por punta en función del asentamiento [MN/m²]

Para el caso en estudio, se obtiene una resistencia de fuste de 2.78 MN para un pilote de 15 metros de largo. Dicha resistencia se obtuvo considerando un estrato licuable de 3 metros, por lo que el pilote desarrolla la mayor parte de su resistencia en el estrato competente. Además, se obtiene una resistencia máxima de punta de 1.34 MN, la cual genera un asentamiento de 1 cm.

Este diseño de pilote entrega una resistencia última de 4.1 MN. Al aplicar un factor de seguridad de 1.5, se tiene un valor máximo admisible aproximadamente de 2750 kN

Por último, se define en nivel de deformación s_{rg} donde el fuste alcanza su máxima capacidad (Qrg), y por lo mismo, entra en fluencia. La norma DIN 4014 establece la siguiente fórmula:

$$s_{rg} = 0.5 \cdot Qrg + 0.5 < 3 \text{ [cm]} \quad (67)$$

Para este caso, la deformación de inicio de la fluencia del fuste es 1.9 cm. A partir de lo desarrollado, se puede formar la curva indicada en la siguiente figura, la que corresponde a la curva carga-deformación del pilote. Además, al considerar la carga admisible del elemento, se observa que alcanza una deformación de 1.6 cm aproximadamente.

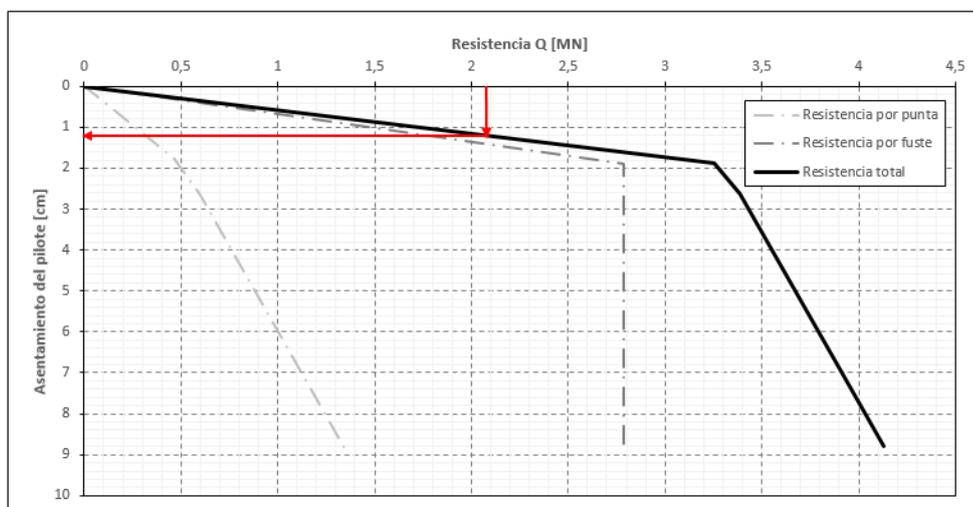


Figura 61: Curva carga deformación en cabezal para pilote de 15 m de longitud

Se descarta el diseño respecto al diseño a tracción por arrancamiento ya que las solicitaciones de diseño en el sentido axial del pilote corresponden a solo valores de compresión.

Para el diseño de carga lateral, la norma DIN 4014 propone un método para determinar el módulo de reacción lateral del suelo. Para ello, considera la siguiente formula y el valor de la resistencia CPT que se utiliza:

$$k_S(z) = k_R \cdot \frac{z}{D_S} \quad (68)$$

En donde:

k_S : Constante de balasto [MN/m³]

k_R : Submódulo de reacción [MN/m³]

D_S : Diámetro del pilote [m]

z : Profundidad [m]

Donde el submódulo de reacción se obtiene de:

Tabla 75: Sub módulo de reacción para suelos granulares [Fuente: DIN 4014]

Resistencia CPT q_c [MN/m ²]	Submódulo de reacción k_R [MN/m ³]
5-10	2
10-15	6,5
> 15	18

Además, para en análisis de carga lateral, es necesario aplicar un factor de reducción de área. Para un pilote de 0.88 m, se tiene un área efectiva de aproximadamente 1.33 m². Al considerar esto, se tiene un módulo de balasto cercano a los 15000 tonf/m para el estrato competente de arena.

Ahora bien, para generar el modelo de carga lateral, se utiliza el software SAP2000. Las características de la barra corresponden a las de una columna de hormigón armado.

Respecto a las condiciones de borde de modelo, se supone un apoyo fijo en la parte inferior del pilote, y uno empotrado deslizante en la parte superior de este, para representar al dado de fundación como una estructura rígida

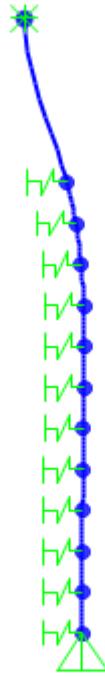


Figura 62: Diagrama de desplazamiento del modelo de pilote

[Fuente: Elaboración propia]

Las máximas cargas axial y de momento debido a la carga de corte se muestran a continuación:



Figura 63: Resultante de momento y carga axial ante carga lateral. SAP2000

Finalmente, al conseguir estos valores, se corroboran que las combinaciones de carga axial y de momento debido a la carga lateral y a la correspondiente sollicitación de diseño, se encuentren dentro del área del diagrama de interacción del elemento.

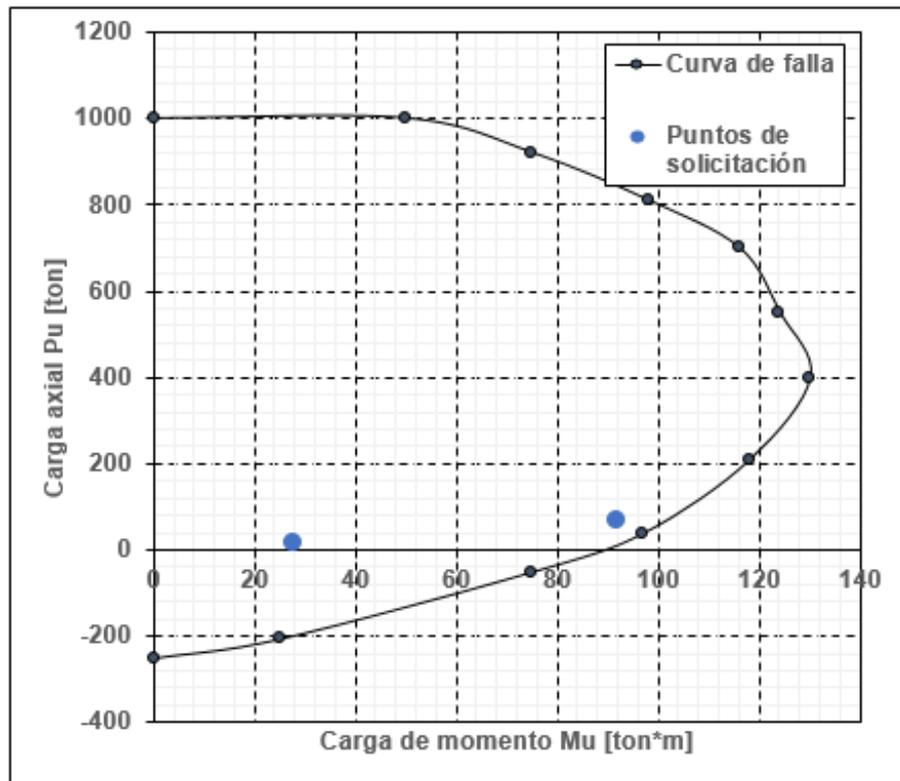


Gráfico 4: Diagrama de interacción Pilote D = 0.88 m, 20Φ22