

Universidad Católica de la Santísima Concepción
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil



ANÁLISIS NUMÉRICO DE MICROPILOTES EN ARENA
LEONEL ALFONSO CONTRERAS CONTRERAS
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Profesor guía: Dr. Felipe Villalobos J.
Profesor informante: Ing. Sergio Villalobos C.

Concepción, Julio 2017

A mí amada familia...

Agradecimientos

A la fuerza mayor que nos renueva de energías en los momentos de extenuación. Que algunos lo atribuimos a Dios y al amor de los cercanos.

A mis amados padres Leonel Arnoldo y Carmen Gloria, quienes de forma incondicional han estado junto a mí durante todo este largo proceso.

De forma especial agradezco a mi profesor guía Felipe Villalobos, quien con mucha paciencia y dedicación logró guiar el desarrollo de este trabajo como un gran mentor y amigo.

También agradezco a Víctor Sandoval quien junto a César Sepúlveda, escucharon y acogieron esta petición, abriendo las puertas de la empresa SYNTEC, en donde se logró el desarrollo de este proyecto investigación.

Por último dedico este trabajo a todas las personas que forman parte de mi vida, en particular mis hermanos Manuel Alejandro y Sthephani Andrea, y a Camila, quienes a través de su compañía y buenos consejos han contribuido en la culminación de esta etapa de vida, y sé que estarán junto a mí en las próximas que ya se inician.

RESUMEN

Los micropilotes son pilotes de pequeño diámetro que se utilizan tradicionalmente en el refuerzo de fundaciones, pueden estar conformados de distintos materiales tales como madera o acero, con o sin lechada de cemento. La evidencia experimental ha indicado que los micropilotes se comportan bien bajo carga estática y sísmica debido a su alta flexibilidad. Por otra parte, las observaciones en el terremoto de Kobe de 1995 indican un buen desempeño de los micropilotes de fricción bajo carga sísmica. Sin embargo, el comportamiento de los micropilotes no se entiende completamente debido al número limitado de pruebas a escala completa y a modelos a escala, así como a la cantidad limitada de estudios en modelos numéricos para micropilotes.

Este proyecto se centra en el modelado con el Método de Elementos Finitos (FEM) de micropilote individual y grupo de micropilotes bajo carga estática vertical y lateral. Inicialmente, se desarrollan modelos estáticos en Elementos Finitos (FE) de la interacción fundación-suelo para realizar el análisis de la respuesta al modelo constitutivo utilizado.

Posteriormente, se desarrollaron modelos de FE para los micropilotes con la implementación constitutiva elasto-plástica del suelo de Drucker-Prager. En la interfaz micropilote/suelo se utilizó una unión con elementos de fricción. Se realizó análisis paramétrico para diversas variables independientes, incluyendo la intensidad de carga, la rigidez del suelo y la variación del mallado para el caso estático. El comportamiento estático de los micropilotes se estudió a través de la comparación de los resultados obtenidos de los modelos FE con los de ensayos a escala real, desarrollados en el Proyecto de Investigación sobre Micropilotes, FOREVER. La respuesta en el caso de micropilote individual y de grupo bajo carga vertical presenta un comportamiento similar al obtenido en los ensayos a escala real, por lo que se considera un buen resultado. Sin embargo, para los casos bajo carga lateral los resultados no fueron los esperados para la respuesta de la interacción suelo-micropilote, dando por resultado un comportamiento de suelo con tendencia lineal en las curvas tensión-deformación y de mayor rigidez al obtenido en el ensayo a escala real.

ABSTRACT

The micropiles are piles of small diameter that are traditionally used in the reinforcement of foundations; they can be conformed of different materials like wood or steel, with or without cement. The experimental evidence has indicated that the micropiles have a good behavior under static and seismic load due to their high flexibility. Nevertheless the Kobe earthquake of 1995 indicates a well performance of friction micropiles under a seismic load. However, the behavior of the micropilotes is not completely understood due to the limited number of full-scale testing and scale models, as well as the limited quantity of studies of numerical models on micropiles.

This project is focused in the modeling using the method of finite elements (FEM) of individual and group of micropiles under vertical and lateral static load. Initially, static models of Finite Elements (FE) were developed from the foundation-soil interaction in order to obtain the answer from the constitutive model used.

Subsequently, the FE models for the micropiles with the elastoplastic constitutive implementation of the Drucker-Prager soil were developed. A connection with friction elements was used in the micropile/soil interface. A parametric analysis was performed for several independent variables, including load intensity, soil rigidity and mesh variation for the static case. The static behavior of the micropiles was studied by comparing the results obtained from the FE models with the full-scale test developed by the Micropile Research Project, FOREVER. The responses in the cases of individual and group micropile under vertical load showed a similar behavior in comparison to the ones obtained in the real-scale tests; this is considered a good result. However, for the cases under lateral load the results were not as expected for the response of the soil-micropile interaction, resulting in a behavior of soil with linear tendency in the stress-strain curves and of greater rigidity to the one obtained in the real scale test.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	ii
ABSTRAC	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
I INTRODUCCIÓN	1
I.1 Introducción y planteamiento del problema	1
I.2 Objetivo	2
I.3 Organización de la tesis	3
II REVISIÓN DE LITERATURA TÉCNICA	4
II.1 Desarrollo histórico	4
II.1.1 Primera aplicación	6
II.1.2 Desarrollo internacional	7
II.2 Características y definición de micropilote	9
II.2.1 Descripción general	9
II.2.2 Definición	10
II.2.3 Clasificación	10

II.3	Materiales que constituyen un micropilote	15
II.3.1	Lechada	15
II.3.2	Acero de refuerzo	17
II.4	Micropilote autoperforante	20
II.4.1	Introducción al sistema	20
II.4.2	Descripción del sistema	21
II.4.3	Procedimiento de instalación	22
II.4.4	Transferencia de carga	24
II.5	Aplicaciones de raíces de micropilotes R.P.R.	28
II.6	Utilización de micropilotes en Chile	30
II.6.1	Proyecto: Enlaces 5, 6 y 7, Puente Llacolén sobre el río Bío Bío	30
III	DISEÑO DE MICROPILOTE	37
III.1	Métodos de cálculo	37
III.1.1	Método tradicional de "Pali Radice"	38
III.1.2	Método francés	38
IV	PROYECTO DE INVESTIGACIÓN FOREVER	46
IV.1	Introducción	46
IV.2	Comportamiento elemental de micropilotes	47
IV.2.1	Comportamiento experimental bajo carga axial	47
IV.2.2	Análisis teórico	48
IV.3	Comportamiento bajo carga lateral	51
IV.3.1	Definición de diferentes tipos de esfuerzos laterales	51
IV.3.2	Rangos de aplicación	52
IV.3.3	Comportamiento de micropilotes bajo carga lateral	52
IV.4	Ensayo de carga en sitio experimental en Saint Rémy	54
IV.4.1	Introducción	54
IV.4.2	Micropilote aislado	56
IV.4.3	Grupo de micropilotes	61
V	MODELOS CONSTITUTIVOS DE SUELOS	66
V.1	Introducción	66
V.2	Modelos elásticos	67
V.3	Modelos elasto-plásticos	69
V.4	Modelo de Drucker-Prager	78

VI	MODELACIÓN NUMERICA	87
VI.1	Elementos finitos	87
VI.1.1	ANSYS	87
VI.1.2	Parámetros	87
VI.1.3	Modelación de la carga	88
VI.1.4	Interacción suelo-estructura	88
VI.1.5	Modelación geométrica y condición de borde	90
VI.2	Validación del modelo	94
VII.2.1	Análisis numérico de pilote	94
VII.2.2	Análisis numérico de cimentación superficial	97
VII	ESTUDIO DE MICROPILOTES	102
VIII.1	Introducción	102
VIII.2	Parámetros	103
VIII.2.1	Suelo	103
VIII.2.2	Micropilote	104
VIII.2.3	Configuración de micropilotes	105
VIII.2.4	Malla de elementos finitos	106
VIII.2.5	Carga aplicada en micropilotes	113
VIII.2.6	Vinculación del tope	114
VIII	RESULTADOS	115
IX.1	Micropilote aislado	116
IX.1.1	Carga vertical	116
IX.1.2	Carga lateral	119
IX.2	Grupo de micropilotes	123
IX.2.1	Carga vertical	123
IX.2.2	Carga lateral	128
IX.3	Análisis paramétrico	133
IX.3.1	Introducción	133
IX.3.2	Micropilote aislado	133
IX.3.3	Grupo de micropilote	142
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
X.1	Resumen	151
IX.2	Conclusiones	152
	REFERENCIAS	157
	ANEXOS	161

ÍNDICE DE FIGURAS

II.1	Arreglo común de un muro de albañilería estabilizado a través de micropilotes reticulados	5
II.2	Datos carga-asentamiento del primer "pali radice" ensayado, Escuela A. Angiloulli, Nápoles, Italia 1952	6
II.3	Principios de ensayos de carga en estructuras de micropilotes reticulados	7
II.4	Estructura de micropilotes reticulados, para el soporte de base y pilar, Jackson, Mississippi	8
II.5	Caso 1: micropilotes cargados de forma directa para proveer soporte estructural y transferir la carga a estratos más competentes	11
II.6	Caso 2: redes de micropilotes reticulados con masa de suelo reforzado, cargado o comprometido Recalce Torre	12
II.7	Clasificación de micropilotes según FHWA	14
II.8	Detalle micropilote con barra tipo GEWI, simple y doble protección	19
II.9	Ejecución de micropilote - anclaje	20
II.10	Detalle de componentes de la barra de acero TITAN	21
II.11	Proceso de perforación, inyección y post-inyección, detalle de comportamiento suelo-cemento	23
II.12	Detalle de interacción barra acero - cemento - suelo	26
II.13	Aplicaciones de R.P.R. no a escala	29
II.14	ENLACE N°6 - Cerro Chepe, ruta 160 Concepción	30
II.15	Vista en planta de una sección de la losa y disposición de micropilotes ENLACE 6	31
II.16	Ejecución 279 Micropilotes ISCHEBECK 73/53 Long. Entre 6.00 y 9.00 m	31
II.17	a) Curva carga - deformación; b) Curva deformación - tiempo, ensayo micropilote, Enlace N°6	32
II.18	Estructura de ensayo de carga a tracción, detalle de ubicación de diales comparadores y celda de carga	33

II.19	Etapa de excavación, bajo puente construido, hasta losa del paso inferior con depresión de napa freática	34
II.20	Sección B-B transversal, Enlace 5	35
II.21	Vista longitudinal Enlace 5	35
II.22	Detalle unión micropilote-losa	36
III.1	Representación esquemática de un tirante (a) y de un micropilote (b)	39
III.2	Ábacos para el cálculo de q_s en arenas y gravas	42
III.3	Ábacos para el cálculo de q_s en arcillas y limos	42
III.4	Representación esquemática de un anclaje sellado en múltiples capas, y la condición de longitud mínima de la última capa	43
IV.1	Curva de deformación axial por compresión en micropilote en función de la carga aplicada en la cabeza durante un ensayo	47
IV.2	Modelo de un micropilote cargado para el modelo de interface de fricción suelo-micropilote	50
IV.3	Micropilote sometido a fuerzas M_0 , M_0 y T_0 en su cabeza	51
IV.4	Micropilote bajo carga por fuerza lateral en parte de su eje	51
IV.5	Movilización de la reacción lateral del suelo por un micropilote	52
IV.6	Curva de reacción de la interacción suelo-micropilote	53
IV.7	Corte del macizo experimental del CEBTP en Saint-Rémy-lès-Chevreuse	55
IV.8	Micropilotes excavados	56
IV.9	Ensayo de carga axial en compresión: curva fuerza/desplazamiento para los micropilotes Tipo II	57
IV.10	Curvas de carga-desplazamiento experimental y teóricas para los micropilotes Tipo II	58
IV.11	Implementación de los dos grupos de micropilotes y 9 micropilotes aislados en el sitio de Saint Rémy-lès-Chevreuse	61

IV.12	Comparación de curvas de carga vertical del grupo de 4 micropilotes (Tipo II _h) y de micropilotes del mismo tipo	63
IV.13	Curva de carga horizontal del grupo de 4 micropilotes del Tipo II _h	65
V.1	Relación de tensión-deformación elástica, a) lineal y b) no-lineal	67
V.2	Respuesta elasto-plástica perfecta	72
V.3	Círculos de Mohr de tensión efectiva	73
V.4	Superficie de fluencia de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones principales	74
V.5	Superficie de fluencia de Drucker-Prager en el espacio de tensiones principales	75
V.6	Superficie de fluencia de Drucker-Prager y Mohr-Coulomb en el plano desviador	76
V.7	Línea de falla de DP y relación de parámetros	78
V.8	Representación de ángulo de dilatación en criterio de falla de DP	80
V.9	Comportamiento de esfuerzo-deformación de cada opción de plasticidad (c) Bilineal isotrópico y (d) Multilineal isotrópico	81
VI.1	Elemento hexaedro de 8 nodos	90
VI.2	Simetría del modelado FE en el micropilote aislado	91
VI.3	Representación de condición de borde en el modelado FE	92
VI.4	Formulación de Newton-Raphson para 3 incrementos de carga	93
VI.5	Idealización del problema en el plano	95
VI.6	Comparación de resultados de los 2 modelos	95
VI.7	Detalle 3D del modelo FE realizado	96
VI.8	Isolíneas de deformación direccional tras la aplicación de la carga	97

VI.9	Fundación corrida situada en arena Ottawa	98
V.10	Idealización del problema de deformación plana en fundación corrida	98
VI.11	Detalle del modelo FE realizado	99
VI.12	Curva carga-desplazamiento: comparación de resultados de ambos FEM con el del cálculo de Terzaghi	100
VI.13	Distribución de la tensión equivalente en la falla	101
VII.1	Bosquejo del detalle del MP, corte transversal	105
VII.2	Arreglo del grupo 4 micropilotes en la plataforma de hormigón, vista en planta y lateral	106
VII.3	Grilla 3D FEM micropilote aislado	107
VII.4	Vista en planta	108
VII.5	Detalle área sección micropilote	108
VII.6	Vista frontal FEM micropilote aislado	109
VII.7	Detalle sección punta micropilote	109
VII.8	Grilla 3D FEM grupo de micropilotes	111
VII.9	Vista en planta grupo de micropilotes	111
VII.10	Vista frontal grilla grupo de micropilotes	112
VIII.1	Distribución de deformación bajo carga vertical en FEM, micropilote individual	116
VIII.2	Curva carga-desplazamiento vertical, micropilote aislado	117
VIII.3	Distribución de desplazamiento horizontal bajo carga lateral en FEM, micropilote individual	119
VIII.4	Curva carga-desplazamiento lateral, micropilote individual	120
VIII.5	Curva carga-desplazamiento lateral, micropilote individual	121

VIII.6	Deformación bajo carga lateral, micropilote individual	122
VIII.7	Distribución de deformación bajo carga vertical en FEM, grupo de micropilotes	123
VIII.8	Fuste generado en enlace suelo-micropilotes	124
VIII.9	Curva carga-desplazamiento vertical, grupo de micropilotes	125
VIII.10	Comparación de curvas de carga vertical entre el grupo de 4 micropilotes (Tipo II) y el micropilote aislado	126
VIII.11	Distribución de desplazamiento horizontal bajo carga lateral en FEM, grupo de 4 micropilotes	128
VIII.12	Rango de deformación elástica	129
VIII.13	Rango de deformación plástica	130
VIII.14	Distribución de esfuerzos	131
VIII.15	Curva carga-desplazamiento lateral, grupo de 4 micropilotes	131
VIII.16	Deformación bajo carga lateral, grupo de micropilotes	132
VIII.17	Curva carga - desplazamiento vertical en variación de módulos E_s del suelo	134
VIII.18	Curva carga - desplazamiento lateral en varios módulos E_s del suelo	135
VIII.19	Variación de la deflexión en la profundidad con diferente módulo de Young de los suelos bajo carga de 11 kN	137
VIII.20	Curva carga - desplazamiento vertical en variación de la grilla, MP aislado	136
VIII.21	Curva carga lateral - desplazamiento en variación de la grilla	139
VIII.22	Curva carga - desplazamiento vertical en variación de la carga aplicada	140
VIII.23	Curva carga - desplazamiento lateral en variación de la carga aplicada	141
VIII.24	Curva carga - desplazamiento vertical en varios módulos E_s del suelo	142

VIII.25	Malla FE del grupo de micropilote bajo carga lateral con elementos de espaciamento en el interfaz	143
VIII.26	Comparación de deflexiones de la cabeza del micropilote de los modelos FE con gapping en varios módulos E_s del suelo	144
VIII.27	Relación entre el incremento de la deflexión de la cabeza debido al módulo E_s y la carga aplicada	144
VIII.28	Relación entre el porcentaje de aumento de la deflexión de la cabeza del micropilote debido al cambio de E_s y la carga	145
VIII.29	Variación de la deflexión con la profundidad de los suelos con un módulo de Young diferentes con la carga de 40 kN	146
VIII.30	Curva carga – desplazamiento en variación de la grilla, grupo de micropilotes	147
VIII.31	Recurso tiempo utilizado en la modelación en distintos graduación de malla	148
VIII.32	Curva carga – desplazamiento lateral en variación de la grilla	149
VIII.33	Curva carga – desplazamiento lateral en variación de la carga aplicada	150

ÍNDICE DE TABLAS

II.1	Clasificación de los diferentes tipos de micropilotes	14
II.2	Fases de inyección según el tipo de suelo	16
II.3	Propiedades mecánicas de refuerzos de pilotes Gewi	17
II.4	Propiedades mecánicas de barras Dywidag	18
II.5	Especificaciones técnicas de las barras TITAN	25
II.6	Tabla F1 DIN 1054-100	26
III.1	Coefficientes de la fórmula de Lizzi	38
III.2	Valores de los coeficientes α para calcular el diámetro medio de sellado de un micropilote o tirante (anclaje) inyectado	41
III.3	Tabla para la elección de ábacos de cálculo de frotamiento lateral unitario límite q_s	41
III.4	Valores de coeficientes de seguridad aplicables para el cálculo de anclajes y tirantes inyectados	45
IV.1	Resumen de ensayos de carga vertical en micropilotes aislados en el macizo de CEBTP	58
IV.2	Resultados de ensayo	59
IV.3	Coefficiente de eficiencia del grupo (Tipo II _n) para diferentes valores de carga axial	62
IV.4	Coefficiente de eficiencia del grupo (Tipo II _n) para diferentes valores de carga horizontal	64
VI.1	Propiedades de los materiales	94
VII.1	Características del suelo del ensayo y modelado FE	103
VII.2	Parámetros utilizados en el diseño del micropilote	104

VIII.1	Resultados carga vertical, ensayo y modelo FE en micropilote aislado	118
VIII.2	Resumen de cargas vertical, ensayo y modelo del grupo de 4 micropilotes	126
VIII.3	Coefficiente de eficiencia de grupos para diferentes valores de carga axial	127
VIII.4	Resumen de resultados de los modelos FE en diferente dimensionamiento de la grilla, MP individual	138
VIII.5	Resumen de resultados de los modelos FE en diferentes mallado, grupo MP	148

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

I.1 Introducción y planteamiento del problema

Debido a la necesidad de construir en suelos de variadas propiedades mecánicas por una parte, y la interacción entre las estructuras y edificios existentes con la finalidad de restringir sus desplazamientos, se han ideado en los últimos 50 años, numerosas técnicas de refuerzo y mejora de los suelos con o sin inclusiones.

Entre las técnicas de refuerzo de suelo por inclusión, los micropilotes ofrecen un amplio alcance para las fundaciones, los tiempos de fundación, excavación y estabilización de taludes y terraplén. Se utilizan durante más de cuarenta años, y ofrecen una solución económica a menudo, a través de los costos entre la cimentación profunda y la cimentación superficial, para aumentar la capacidad de carga o limitar el desplazamiento.

Sin embargo, el comportamiento de un solo micropilote y un grupo de micropilotes no es entendido completamente, debido al número limitado de ensayos completos y modelos a escala, así como la cantidad limitada de estudios en modelos numéricos de micropilotes.

Es en este marco que el método de elementos finitos (FE) proporciona una herramienta para comprender el comportamiento de los micropilotes. El análisis FE se puede utilizar para modificar sistemáticamente los parámetros que afectan la respuesta de la interacción suelo-micropilote. Sin embargo, el análisis de la interacción suelo-micropilote-estructura es un problema complejo. El problema incluye la no linealidad del suelo (por ejemplo, la variación del módulo de corte del suelo y amortiguamiento con deformación), abertura y el deslizamiento entre el micropilote y el suelo, condiciones de contorno complejas (especialmente en los bordes verticales laterales), y posible no linealidad del pilote.

I.2 Objetivo

El motivo de esta investigación, es analizar la contribución de las herramientas computacionales en el estudio del comportamiento en problemas ingenieriles, en específico validar el uso de la herramienta ANSYS en el modelado de un sistema suelo-estructura, esto mediante la implementación FEM de un ensayo a escala real.

El alcance del proyecto de investigación se centra en el modelado FE de micropilotes (finite elements). Los objetivos del proyecto son estudiar:

- a. la construcción de un modelo FE estático para el análisis de la respuesta de sitio donde los límites laterales y el comportamiento del suelo se modelen apropiadamente,
- b. obtener el comportamiento de un micropilote aislado, bajo régimen de carga estática del tipo lateral y vertical,
- c. obtener el comportamiento estático de un grupo de micropilotes, bajo carga del tipo lateral y vertical,
- d. validar el uso del software ANSYS en la modelación de problemas de geomecánica.

I.3 Organización de la tesis

El trabajo presente consiste en 10 capítulos. Una breve descripción de cada uno de los capítulos es presentada a continuación.

Capítulo I, presenta el planteamiento del problema, los objetivos del estudio realizado y la organización de la tesis completa.

Una extensa revisión literaria es presentada en el Capítulo II. Los temas incluyen el desarrollo histórico de los micropilotes, una descripción general en donde se presenta sus características, clasificación y materiales que lo constituyen. Por último se presenta el tipo de micropilote auto-perforante, y obras en Chile donde se han utilizado.

El Capítulo III trata sobre los procedimientos de construcción y de diseño de los micropilotes.

En el Capítulo IV, se presenta un resumen del estudio realizado en FOREVER, proyecto francés en el que se investigó el comportamiento elemental de los micropilotes. Se presenta la teoría que rige la respuesta de un micropilote aislado y de un grupo, bajo la acción de cargas vertical y lateral.

Capítulo V trata sobre la modelación numérica y presenta las características principales de los modelos constitutivos utilizados en la modelación de suelos, en particular el caso de Drucker-Prager, utilizado en el siguiente estudio.

El Capítulo VI, presenta el software de modelación numérica ANSYS el cual a través del método de elementos finitos y junto a la implementación del modelo constitutivo de Drucker-Prager, es utilizado en la creación de modelos FE de la interacción micropilote-suelo. Igualmente se presenta los ensayos en micropilotes a escala real realizados en FOREVER que serán utilizados en los modelos FE, junto a los modelos FE que validan la utilización del Software ANSYS.

El Capítulo VII, presenta las características del estudio realizado en los modelos FE, tanto los parámetros utilizados en el modelo constitutivo del suelo y los utilizados en la estructura del micropilote, además se presenta las condiciones de borde utilizadas en los modelos aislado y en grupo.

El Capítulo VIII, presenta los resultados obtenidos de la modelación numérica en FE, junto con el análisis paramétrico realizado a los modelos obteniendo el comportamiento bajo distintas condiciones de carga y condiciones de suelo.

Por último, el Capítulo IX enumera las conclusiones extraídas del estudio y se nombran recomendaciones para futuras investigaciones.

Capítulo II

REVISIÓN DE LITERATURA TÉCNICA

II.1 Desarrollo histórico

Se atribuye la invención de los micropilotes al Dr. Ing. Fernando Lizzi de origen italiano en el año 1952, nombrándolos como "reticolo di pali radice" (raíz de pilotes reticulados: R.P.R.) es un tipo de reforzamiento del suelo en terreno, obtenido por la introducción en él de una red especial de raíces de pilotes, antes de cualquier excavación. "Como en el hormigón armado, las redes de pilotes intentan incrementar la resistencia total sobre la estructura suelo/pilote y suplir la resistencia a tracción, donde es requerida, o sea necesaria" (Lizzi, 1952).

Su tecnología fue desarrollada a través de la empresa Fondedile S.P.A. en Nápoles Italia, donde F. Lizzi ejerció el cargo de Director Técnico. Nació bajo la búsqueda de un método para estabilizar/apuntalar monumentos y construcciones históricas que habían sufrido daño debido a los conflictos bélicos de esa época.

Los requisitos que debía cumplir este sistema eran:

- debía aceptar cargas estructurales;
- con un mínimo de movimientos en la instalación;
- que fuera instalado en difíciles áreas de trabajo;
- y se pueda instalar en distintos tipos de suelos.

Además de los métodos constructivos impuestos, debían ejercer el mínimo de efectos adversos sobre la estructura que se está estabilizando o las estructuras adyacentes (Bruce, DiMillio & Juran, 1997).

Estos pilotes eran ideales para aplicaciones de estabilización. De reducido diámetro, alrededor de 100 mm que eran permitidos en las construcciones, instalados con equipos de pequeño tamaño, con perforación rotativa que podían operar en condiciones de acceso limitado, los que perforaban las estructuras y subsuelo con un mínimo de perturbación. El reforzamiento consistía en lechada inyectada de arena gruesa, cemento y agua, que proporciona una elevada adherencia friccional con el suelo que lo circunda. Los cuales fueron ensayados con cargas sobre los 400 kN, y no presentaron fallas en la interfaz suelo/lechada. Los manuales de ese tiempo anticipaban cálculos de carga para pilotes perforados de grandes diámetros, cercanos a los 100 kN.

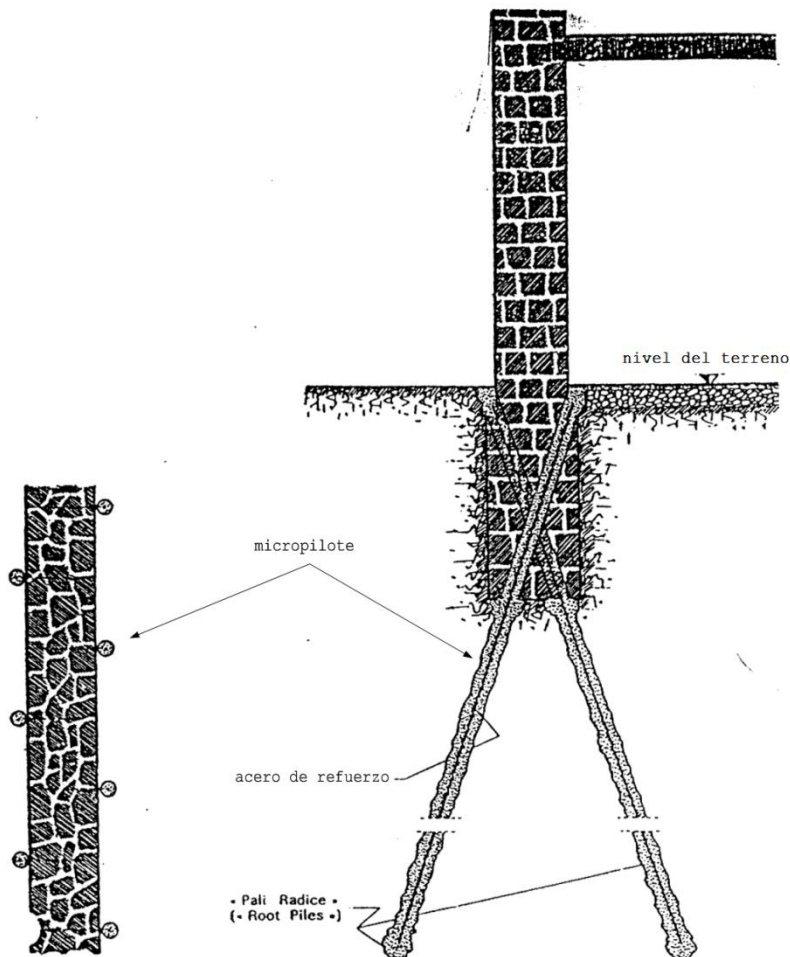


Figura II.1 Arreglo común de un muro de albañilería estabilizado a través de micropilotes reticulados (Lizzi, 1952)

II.1.2 Desarrollo internacional

Según Bruce et al. (1997), es fácil estar de acuerdo con el Dr. Lizzi después de la evaluación de 1982 que "la introducción de los 'pali radice' (P.R.) dio lugar a un cambio completo en el campo de la estabilidad".

Debido a la aceptación de la técnica en los círculos internacionales, el uso de los micropilotes se extendió rápidamente.

Europa:

- En 1962 Fondedile introdujo los micropilotes (P.R.) en el Reino Unido, principalmente para apuntalar las estructuras históricas amenazadas por décadas de abandono y descuido.
- En 1965, un sistema similar fue utilizado en Alemania en asociación con el Transporte Urbano Subterráneo. En donde se destaca la utilización de la norma DIN 4014 de pilotes pre-excavados la cual limitaba a 400 mm de diámetro del pilote para un rango de 300 - 370 kN de capacidad, comparado con la capacidad demostrada de los micropilotes que excedía los 1000 kN para diámetros de 120 - 250 mm. En 1983 fueron separados de la norma y se especificaron en la norma DIN 4128.
- En la misma década en Italia, P.R. fueron utilizados en la construcción de algunos sectores del Metro de Milán, en donde se introdujo autoritariamente el término de micropali y así evitar el uso del término ya patentado.

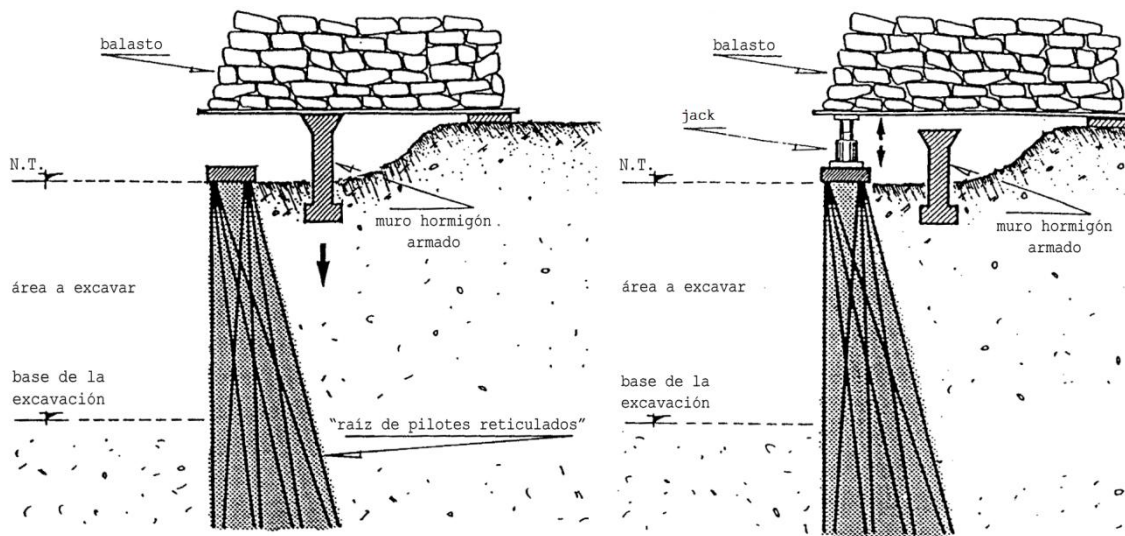


Figura II.3 Principios de ensayos de carga en estructuras de micropilotes reticulados;
 1ª fase: carga aplicada detrás del muro; 2ª fase: carga aplicada en el muro.
 Metro de Milán, 1957 (Lizzi, 1982)

Estados Unidos:

- En 1973 Fondedile introdujo los micropilotes en Estados Unidos, ejecutando numerosos trabajos de estabilización, principalmente en Nueva Inglaterra.
- En 1975 se utilizaron raíces de pilotes reticuladas (R.P.R.) para apoyar y estabilizar el pilar y la fundación a lo largo del puente I-55 en Jackson, Mississippi.
- En noviembre de 1977, una estructura similar fue terminada en el Bosque Nacional Mendocino, California, para estabilizar un área de deslizamiento de tierra a lo largo del camino del bosque.

Todos estos proyectos fueron instrumentados por el Cuerpo de Ingenieros de la U.S. Army, bajo el contrato de la División de Investigación de la FHWA (Palmerton, 1984).

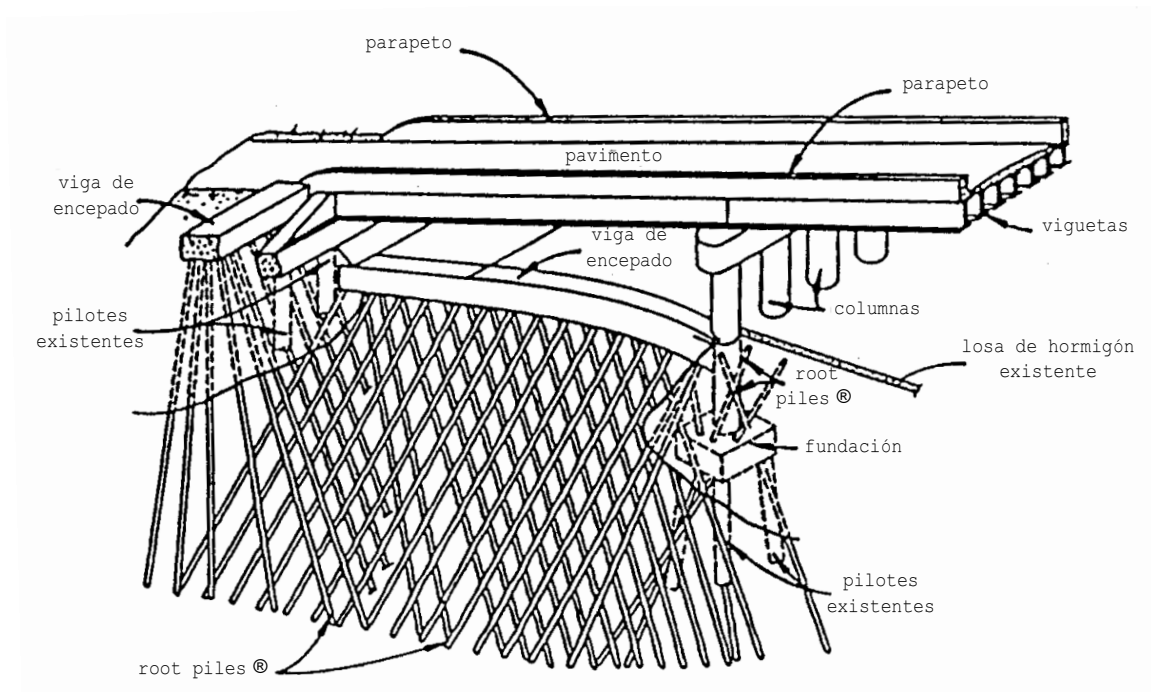


Figura II.4 Estructura de micropilotes reticulados, para el soporte de base y pilar, Jackson, Mississippi (Lizzi, 1978)

II.2 Características y definición de micropilote

II.2.1 Descripción general

La clasificación de los micropilotes difiere de los pilotes, según su descripción los pilotes se encuentran divididos en 2 grandes tipos: pilotes de desplazamiento y pilotes de reemplazo (Fleming, 1985).

- **Pilotes de desplazamiento:** Pertenecen los que son hincados a través de un martinete por medio de golpes o vibrados en el suelo, así desplazando al suelo lateral que lo rodea durante su instalación.
- **Pilotes de reemplazo:** Son aquellos que están colocados o construidos dentro de un pozo pre-excavado, sustituyendo así el terreno excavado. Llamados así debido al reemplazo del material sacado, usualmente suelo por el pilote.

Los micropilotes son un subconjunto de pilotes perforados de pequeño diámetro, colocados en terreno (Bruce et al., 1997). En la mayoría de los pilotes convencionales pre-excavados colocados en terreno, la mayor carga es resistida por el hormigón en vez del acero. Al tener una pequeña área de sección transversal, es de esperar una baja capacidad estructural. Sin embargo los micropilotes se distinguen por no seguir ese patrón: los nuevos métodos de perforación e inyección, como las desarrolladas en la práctica de geotecnia, tales como en el suelo apernado, permiten mayores valores de adherencia lechada/suelo generados a lo largo del micropilote. Al utilizar acero de alta resistencia en casi el 50% del volumen de la perforación, como el elemento de soporte de carga principal, que a través de la lechada circundante, mediante la fricción se transfiere la carga aplicada entre el acero y el suelo.

II.2.2 Definición

Según el Documento Técnico Unificado, Francia (D.T.U., 1978) el micropilote se define como pilote perforado de pequeño diámetro, de menos de 250 mm.

Según la Federal Highway Administration, U.S.A (FHWA, 2000) basado en las características tradicionales, se puede definir al micropilote como:

De pequeño diámetro (< 300 mm), pilote perforado de reemplazo, compuesto de lechada colocada o inyectada, que normalmente se refuerza con acero, para resistir las grandes cargas a los cuales han sido diseñados. Esta carga inicialmente es recibida por el acero y traspasada mediante la lechada a la roca o suelo. Soportan cargas axiales y/o laterales, y puede ser considerado como un sustituto de pilotes convencionales o como un compuesto de masa (suelo/pilote), según el concepto de diseño empleado.

La mayoría de los micropilotes está entre los 100 - 250 mm de diámetro, 20 - 30 m de longitud, y 300 - 1000 kN en compresión o tensión de carga de servicio.

II.2.3 Clasificación

Los micropilotes se clasifican en general en primer lugar, de acuerdo con el diseño de la aplicación y por segundo el método de inyección. La aplicación del diseño es determinado por la función de ellos, mientras que el método de inyección define la capacidad de unión lechada/suelo.

Según el informe realizado por Bruce, DiMillio y Juran (1995) y formalizado después por Bruce y Juran (1997) para la Federal Highway Administration de USA, los micropilotes se clasifican en base a dos criterios:

- la filosofía del comportamiento
- el método de la inyección.

II.2.3.1 Filosofía del comportamiento

El diseño individual o de grupo de micropilotes es muy diferente al de una red de micropilotes reticulados de estrecho espacio. Esto llevó a la definición del Caso 1 y Caso 2. Por lo tanto en la aplicación de diseño, hay dos tipos generales de clasificación.

Caso 1: el primer tipo es cuando el micropilote se carga directamente de forma axial o lateral, en donde el refuerzo de acero resiste la mayoría de la carga aplicada. Este tipo de micropilote se utiliza para transferir las cargas estructurales a estratos más profundos, competentes y estables, puede ser utilizado para restringir los movimientos en planos de falla de laderas o taludes. La resistencia a las cargas se debe principalmente a la capacidad estructural de la armadura de acero y geotécnicamente a la zona de unión lechada/suelo.

Cuando los micropilotes de este tipo son cargados axialmente para transferir la carga a un estrato o fundación más estable, se producen movimientos en la cabeza micropilote, en proporción a la longitud y el fuste de este. Para evitar esto pueden ser precargados para asegurar que la estructura que cubra se pueda apoyar sin más desplazamientos (Bruce, Pearlman & Clark, 1990).

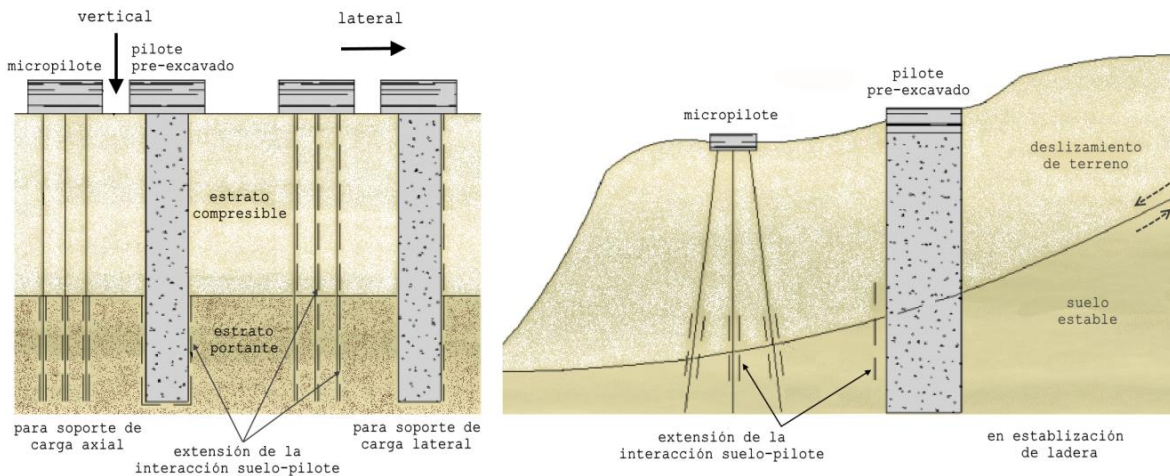


Figura II.5 Caso 1: micropilotes cargados de forma directa para proveer soporte estructural y transferir la carga a estratos más competentes (FHWA, 2000)

Caso 2: el segundo tipo de diseño es donde el micropilote no es cargado de forma directa, sino que es un componente que refuerza el suelo, creando una masa compuesta de suelo reforzado, que resistirá las sollicitaciones de un mejor modo, esto se conoce como red de micropilotes reticulados. Esta aplicación de micropilotes sirve para delimitar y fortalecer internamente el suelo compuesto, dando a la vez mayor estabilidad y apoyo.

En esta idea, ellos delimitan en una zona reforzada del material compuesto confinado, que ofrece resistencia al mínimo movimiento. Los micropilotes están completamente unidos al terreno en toda su longitud y así en este caso al desempeño, el suelo sobre todo su perfil, debe tener un grado razonable de compatibilidad.

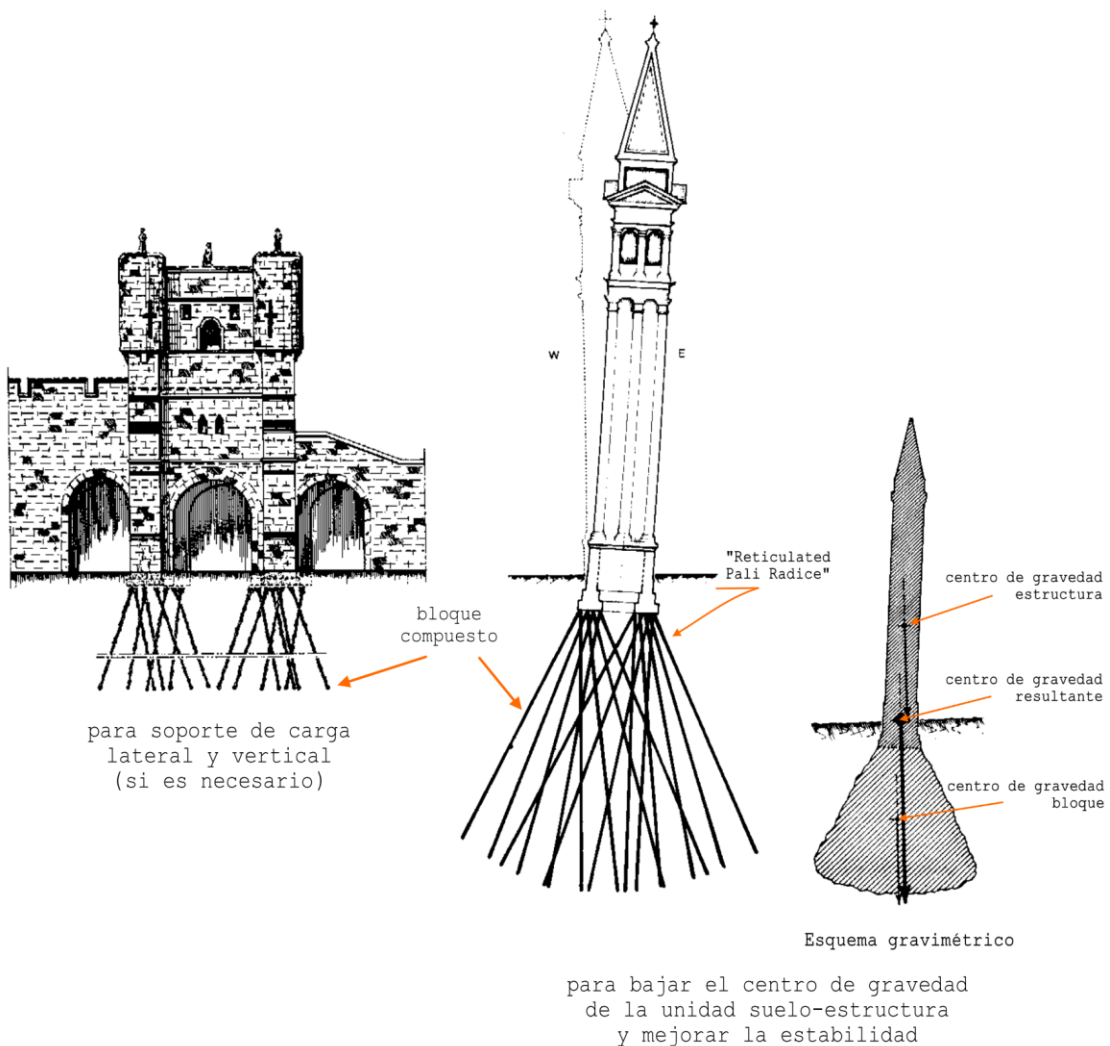


Figura II.6 Caso 2: redes de micropilotes reticulados con masa de suelo reforzado, cargado o comprometido (Bruce, 1996), de Recalce Torre Burano, Lizzi (1985)

II.2.3.2 Metodología de inyección

El método de inyección es generalmente el más sensitivo control de construcción relacionado con la capacidad de adherencia (lechada/suelo) y varía directamente con el método de ejecución. La segunda parte de la clasificación de micropilotes se basa principalmente en el método de colocación y la presión de inyección que se utiliza durante la construcción.

La Figura II.7 reproduce la clasificación de los micropilotes propuesta por Bruce et al. (1995), y que es basado en los cuatro tipos de la clasificación original francesa, Tabla II.1 (D.T.U. 13.2/Additif, 1991):

- **Tipo A:** mortero o lechada de cemento puesto bajo el efecto de gravedad, la perforación está equipada con o sin refuerzo;
- **Tipo B:** inyección a través del encamisado, mientras este es retirado. La presión típica está en el rango de 0.3 - 1 MPa, se limita para evitar la hidrofracturación del suelo y el consumo excesivo de lechada. El obturador se sitúa en la boca del micropilote;
- **Tipo C:** proceso de 2 fases, lechada de cemento primaria (Tipo A), posterior una inyección de lechada (15 a 25 minutos después, antes del endurecimiento) a través de la entubación o de una tubería específica. La presión es del orden de 1 MPa. La inyección es global y unitaria, sistema francés (IGU). El obturador se sitúa en la boca del micropilote;
- **Tipo D:** proceso de varias fases, lechada de cemento primaria colocada bajo la gravedad (Tipo A & C) o presurizado (Tipo B). Luego inyección de lechada con obturadores dentro del tubo, presión del orden de 2 - 8 MPa y generalmente produce hidrofracturación. La inyección es repetitiva y selectiva, sistema francés (IRS).

II.2.3.3 Uso combinado

A los micropilotes por lo tanto, se les puede asignar un número de clasificación que denota la filosofía de su comportamiento (Caso 1 & 2), que se refiere fundamentalmente al enfoque del diseño, y la letra que indica el método de la inyección (Tipo A, B, C, o D), lo que refleja el mayor control de construcción sobre la capacidad.

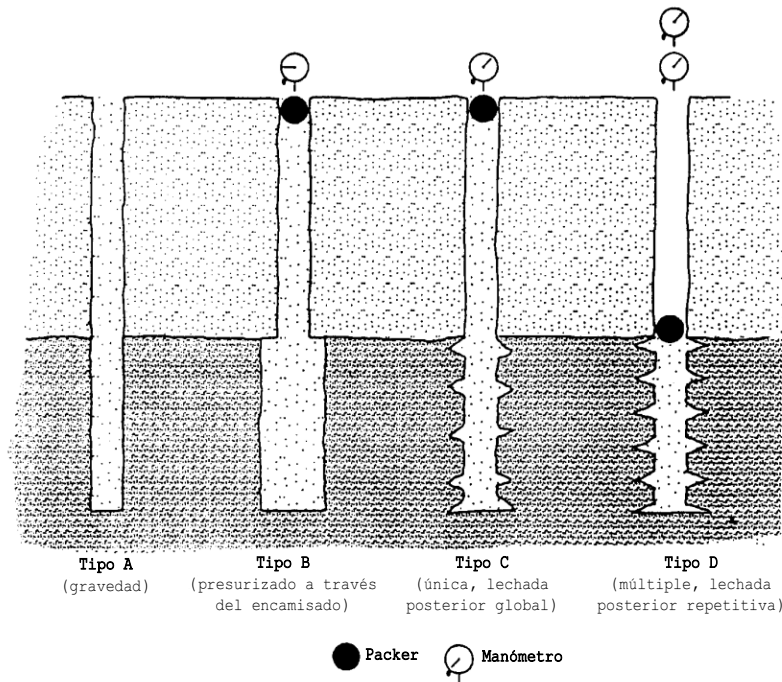


Figura II.7 Clasificación de micropilotes según FHWA 2000 (Bruce et al., 1995)

Tabla II.1 Clasificación de los diferentes tipos de micropilotes (D.T.U. 13.2, 1978)

Tipo	Diámetro (mm)	Descripción y material de forado	Reemplazo de forado (perforación)	Nota	Denominación
I	< 250	pilote perforado entubado, la perforación está equipada con o sin refuerzo	llenado con mortero de cemento por medio de un tubo embolo	el entubado es recuperado obturándolo en el tope y poniéndolo bajo presión por encima del mortero	--
II	< 250	pilote perforado, la perforación está equipada con armadura	llenado de lechada o mortero de sellado por gravedad o bajo una presión muy baja a través de un tubo émbolo		--
III	< 250	pilote perforado, la perforación está equipada de armadura y de un sistema de inyección que es un tubo manguito introducido en una funda de lechada de cemento; si el refuerzo es un tubo de metal, este tubo puede estar equipado de manguitos y tomar el lugar del sistema de inyección	inyección, hecha en el tope a una presión superior o igual a 1 MPa; es global y unitaria	la perforación puede ser reemplazado mediante chorro, batido o hincado si la naturaleza del suelo lo permite	IGU (inyección global unitaria)
IV	< 250		inyección de obturación simple o doble de lechada o mortero de sellado a una presión de inyección superior o igual a 1 Mpa; es repetitiva y selectiva		IRS (inyección repetitiva selectiva)

II.3 Materiales que constituyen un micropilote

Un micropilote se compone de dos partes; de lechada (normalmente inyectada) y de refuerzos de acero.

II.3.1 Lechada

Bustamante y Doix (1985) afirman que, para un suelo dado, la resistencia de un micropilote depende de varios factores:

- la técnica de ejecución de la lechada o método de sellado;
- el número de fases (pasadas) de la inyección (N_i) y las cantidades finales de lechada inyectada (V_i);
- las presiones efectivas de inyección (p_i);
- el flujo de inyección (Q_i);
- por último, la naturaleza de la lechada con propiedades reológicas y mecánicas, que deberá cumplir con el documento francés de especificaciones TA 86 (1986).

En cuanto a la técnica de ejecución de la lechada, pruebas comparativas muestran que el método de sellado IRS (ver Tabla II.1) ofrece una mejor resistencia, en relación con el modo IGU de sellado (ver Tabla II.1) (Bustamante & Doix, 1985).

II.3.1.1 Lechada inyectada V_i

La cuantía total de la lechada inyectada V_i es un parámetro significativo que determina la capacidad de anclaje del sellado. Su estimación sin embargo, sigue siendo muy difícil. Bustamante y Doix (1985) propusieron reglas para el número de fases inyección N_i para suelo suelto y el suelo rocoso, se resume en la Tabla II.2.

II.3.1.2 Presión de inyección p_i

Gouvenot (1973) y Bustamante (1980) explican que p_i menor o igual o ligeramente mayor que la presión límite del terreno p_1 , garantiza micropilotes IRS, al menos para suelo blando, equipos sellan significativamente mejor que aquellas presiones p_i conducidas prácticamente a gravedad que representan sólo una pequeña fracción de p_1 . Cabe destacar que esto es menos cierto en formaciones compactas y de naturaleza rocosa.

Bustamante y Doix (1985), simplifican los criterios de selección de la presión p_i , propuesto para los diferentes sistemas:

- $p_i > p_1$ para micropilotes IRS;
- $0.5 \cdot p_1 < p_i < p_1$ para micropilotes IGU;

con, p_1 presión límite del terreno obtenido del ensayo presiométrico.

Tabla II.2 Fases de inyección según el tipo de suelo (Bustamante y Doix, 1985)

Tipo de suelo	N_i	Cantidad inyectada	Nota
suelo suelto (arcilla, arena y grava)	3	para $N_i = 1 : V_1 = V_i/2$	dejar entre fases consecutivas de 6 a 12 hrs. para evitar la resurgencia
		para $N_i = 2 : V_2 = V_i/4$	
		para $N_i = 3 : V_3 = V_i/4$	
suelo rocoso y muy compacto	2	para $N_i = 1 : V_1 =$ la mayor parte de V_i	la segunda fase es para, simplemente completar la inyección
		para $N_i = 2 :$ el resto de V_i	

II.3.1.3 Caudal de inyección Q_i

En cuanto al caudal Q_i de inyección, los datos son escasos. Según el trabajo de Bustamante (1980) para barras (tirantes) de la gama IRS en arcillas plásticas, bajo flujo reduce el riesgo de pérdida de lechada de cemento utilizado en la construcción del bulbo. Bustamante y Doix (1985) encontraron que los siguientes rangos de flujo conducen a una buena calidad de sellado:

- 0.3 a 0.6 m^3/h para suelo cohesivo;
- 0.8 a 1.2 m^3/h para suelo friccional (granular).

II.3.2 Acero de refuerzo

La carga que deben soportar los micropilotes dicta la cantidad de refuerzo. Por ejemplo, micropilotes de baja capacidad, reaccionando solamente en compresión, tiene un armazón de barras de alta resistencia apoyados por refuerzo helicoidal o un número limitado de barras de alta resistencia. Cuando éstos micropilotes reaccionan en tracción este último método es adoptado (Bruce, 1992).

Para mayor capacidad y para minimizar la deflexión o resistir acciones laterales intensas, se utilizan generalmente tubos. Este tipo de reforzamiento tiene un gran radio de giro y el momento de inercia idéntico en todas las direcciones, y por lo tanto buenas propiedades intrínsecas.

En la práctica, se utiliza como refuerzo para micropilotes (Amar, 1993):

- barras de acero de alta adherencia;
- barras Gewi;
- barras Dywidag o paquetes de barras;
- tuberías de "gas, o petróleo";
- etc.

La Figura II.8 muestra un ejemplo de armadura tipo Gewi (Documento DSI, 2013) y la Tabla II.3 da las propiedades mecánicas (Documento DSI, 1994).

Tabla II.3 Propiedades mecánicas de refuerzos de pilotes Gewi
(Documento Dywidag - Systems International, 1994)

GEWI-Pile, propiedades acero												
grado acero	diámetro barra		área sección transversal		carga límite		carga fluencia		peso nominal		diámetro máx. hilo barra	
	N°	mm	in ²	mm ²	kips	kN	kips	kN	lbs/ ft	kg/m	in	mm
60	# 14	43	2,3	1452	202,5	901	135	601	7,7	11,4	1,9	47,2
60	# 18	57	4	2581	360	1601	240	1068	13,6	20,2	2,5	63,5
75	# 20	63,5	4,9	3167	491	2184	368	1637	16,7	24,9	2,7	69
60	3x#14	3x43	6,8	4356	607,5	272	405	1802	23	31,1	-	-
60	3x#18	3x57	12	7743	1080	4804	720	3203	40,8	60,7	-	-
75	5x#20	5x63,5	14,7	9501	1473	6552	1104	4911	50,1	74,6	-	-

Los datos para las barras Dywidag se proporcionan en la Tabla II.4

Tabla II.4 Propiedades mecánicas de barras Dywidag (Bruce, 1992)

Grado acero fluencia/última N/mm ²	Numero de barras	Diámetro nominal mm	Carga última	Carga trabajo				Carga fluencia	Carga trabajo		
			$F_z =$ $B_z \times A$ kN	Carga última/ 1.6 kN	Carga última/ 1.7 kN	Carga última/ 1.8 kN	Carga última/ 1.9 kN	$F_s =$ $B_s \times A$ kN	0.75×carga fluencia (carga fluencia/1.33) kN	0.6×carga fluencia (carga fluencia/1.33) kN	carga fluencia/1.75 kN
835/1030	1	26.5	568	355	334	316	284	460	345	276	263
835/1030	1	32.0	828	518	487	480	414	671	503	403	384
35/1030	1	36.0	1048	655	627	583	524	850	637	510	485
1060/1230	1	26.5	678	424	377	339	339	595	446	357	340
1060/1230	1	32.0	989	618	582	495	495	888	651	521	495
1060/1230	1	36.0	1252	783	736	626	626	1099	824	659	628

Designación de acuerdo a estandarización SI: F = fuerza, A = Área de la sección transversal del acero

Se da en la Tabla III.1 armaduras utilizadas para los micropilotes de producción por empresas francesas, del tipo TM micropilote IRS, propuesto por la empresa Bachy en 1976.

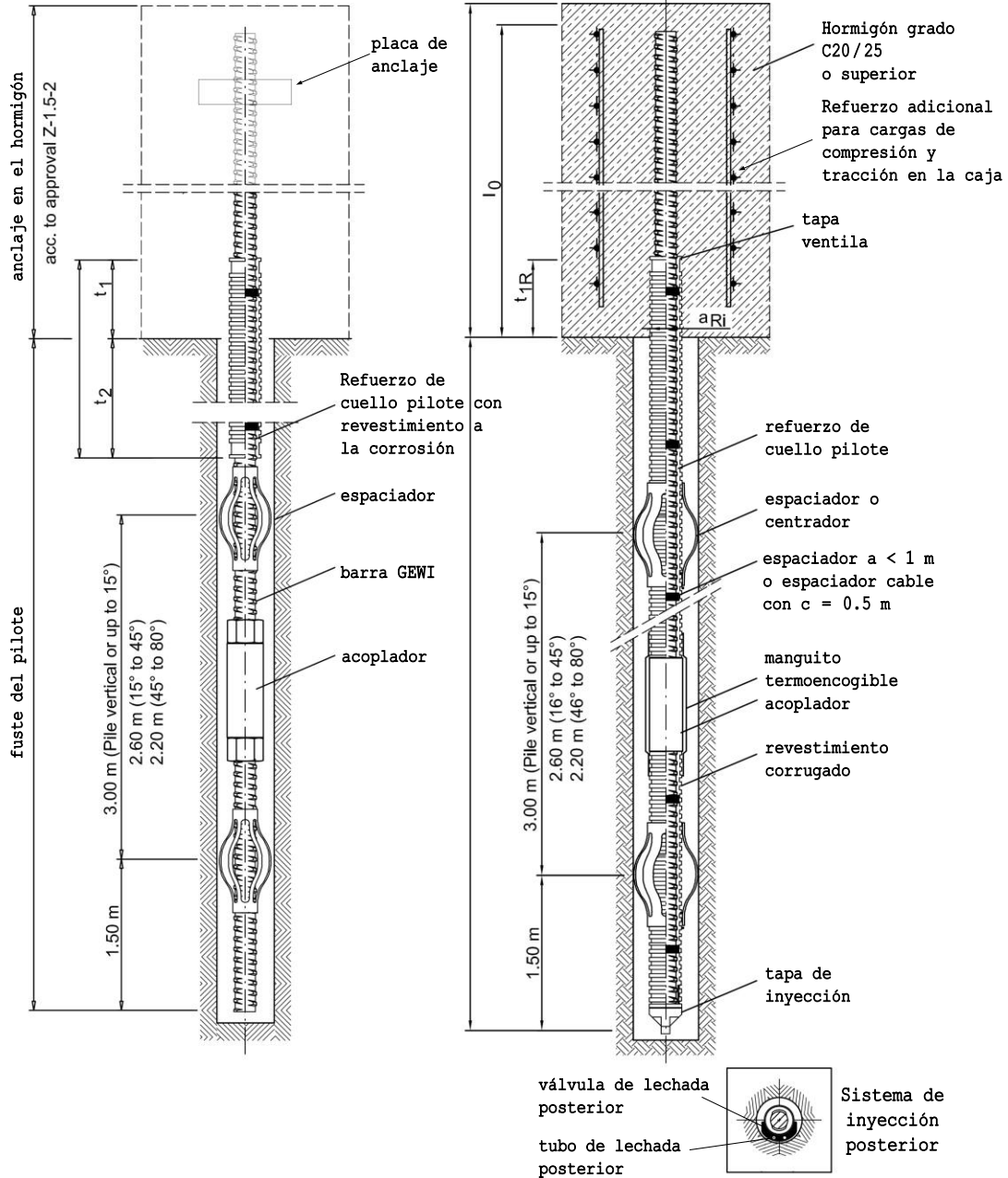


Figura II.8 Detalle micropilote con barra tipo GEWI, simple y doble protección (Documento DSI, 2013)

II.4 Micropilote autoperforante

II.4.1 Introducción al sistema

En esta sección se da a conocer las características técnicas de los micropilotes autoperforantes ISCHEBECK TITAN, y el método de instalación.

Es un sistema versátil de anclaje autoperforante de inyección, el cual puede ser utilizado para distintos tipos de sistemas de reforzamiento del suelo y de recalce de fundaciones, son empleados como micropilotes, anclajes, bulones y suelo armado.

Fue creado y desarrollado por el Diplomático Ingeniero Ernst Ischebeck en 1983 en Alemania, la mayor ventaja que posee este sistema es que su instalación y ejecución se realiza en una sola operación: perforación, colocación de la armadura e inyección. Reduciendo los costos y tiempos de operación que requieren otros sistemas convencionales.

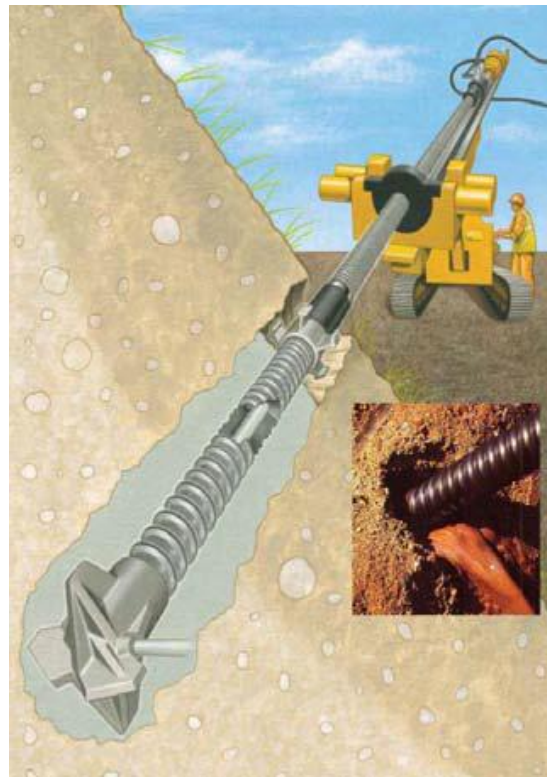


Figura II.9 Ejecución de micropilote – anclaje
(Documento Ischebeck, 2008)

II.4.2 Descripción del sistema

Los micropilotes autoperforantes son constituidos de una barra-tubo central hueca, roscada por laminación en frío como sección de acero portante y un cuerpo inyectado de cemento perimetral, que transmite las cargas de tracción y/o compresión mediante el roce entre la barra a través del cuerpo inyectado de cemento al suelo. Estos micropilotes-anclajes, perforados e inyectados dinámicamente se les denominan como micropilotes inyectados o de inyección.

Compuesto de un tubo roscado de acero, empalmado mediante uniones o manguitos roscados externos y juntas de estanqueidad centrales, y provistos de una broca de perforación desechable.

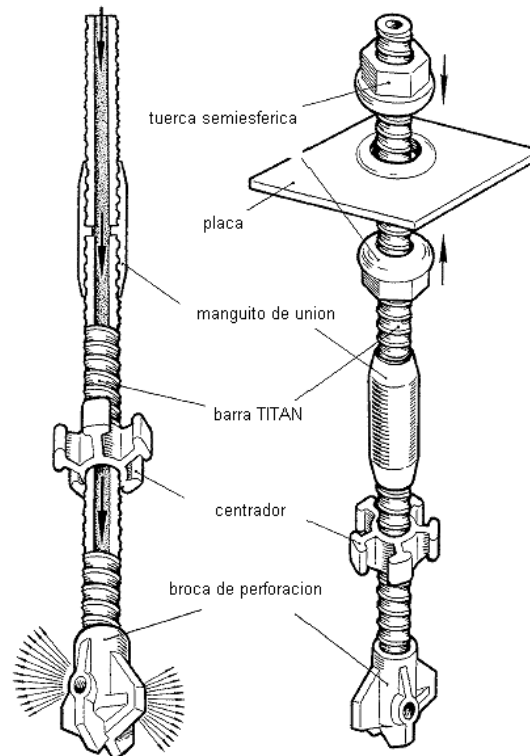


Figura II.10 Detalle de componentes de la barra de acero TITAN
(Documento Ischebeck, 2008)

II.4.3 Procedimiento de instalación

II.4.3.1 Barrido e inyección

El tubo roscado es al mismo tiempo barra de perforación perdida, armadura y tubo de inyección. Evitando el trabajo de retirar los tubos de encamisado e inserción de la barra de armadura. Se realiza con lechada de cemento al mismo tiempo que se hace la perforación. La lechada se introduce a través de la barra, la cual sale inyectada por la broca de perforación, con circulación inversa.

Actúa a la vez como:

- barrido/limpieza de la perforación;
- lodo tixotrópico que mantiene estable la pared de la perforación;
- inyección del bulbo.

Al inyectar la lechada se produce un recubrimiento con cemento el cual produce un encaje radial en el terreno, da resistencia al pandeo y protege contra la corrosión. Se garantiza un recubrimiento mínimo de 20 mm a través de los espaciadores que se sitúan delante de cada mango. Se ha demostrado que la mecánica de los micropilotes-anclajes inyectados produce una reducida deformación en comparación a la de los pilotes hincados e inyectados (asentamientos < 5 mm bajo carga útil). Poseen una alta resistencia al corte entre el cuerpo de inyección y terreno, a los pocos milímetros de movimiento el roce se encuentra activado.

II.4.3.2 Perforación e inyección

La perforación con lechada de cemento que a la vez es el lodo de soporte con una proporción (A/C) de 0.4 a 0.7 (40 a 70 litros de agua para 100 kg de cemento). Bajo un flujo de presión de 5 a 20 bar, el agua es rápidamente absorbida por el suelo no cohesivo cementado, la superficie anular queda estabilizada. El recubrimiento filtrado alrededor de la barra se le llama inyección primaria, que mejora la resistencia al corte entre el cuerpo inyectado y el suelo. Quedando el cemento homogéneamente encajado con la estructura de los granos de suelo.

La perforación con roto-percusión bajo inyección de lechada produce una mejora de suelos similar a la de los pilotes de desplazamiento tipo Franki. La vibración en la perforación, actúa del mismo modo que un vibrador de hormigón da como resultado un cuerpo de cemento homogéneo y compacto.

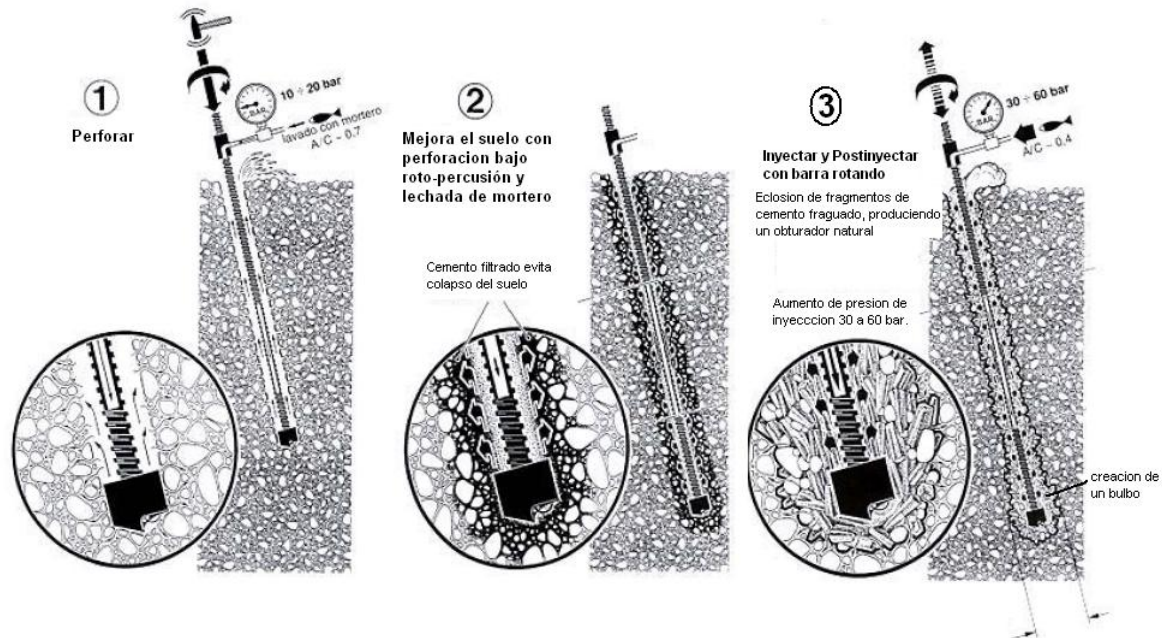


Figura II.11 Proceso de perforación, inyección y post-inyección (si es necesario), detalle de compactamiento suelo-cemento (Documento Ischebeck, 1999)

II.4.3.3 Broca perforante

La rosca continua que permite en cada posición la extensión o roscabilidad, o sea la fijación con placas y tuercas, la unión con manguitos o el corte a longitudes inferiores en la obra y el atornillado de brocas adecuadas al terreno. Hay una gran variedad de brocas para cada tipo de suelo. La rosca es auto-bloqueante y no se necesitan contratuercas.

II.4.3.4 Post-inyección

Si no se alcanza una presión > 10 bar en la inyección, frente a la presión de lavado, esto inmediatamente al terminar la perforación, se puede realizar una post-inyección en la fase de fraguado del cemento (< 6 hr) utilizando un cabezal-conector, hasta que se obtenga la presión deseada.

II.4.4 Transferencia de carga

II.4.4.1 Acero

La base de los micropilotes de inyección, es el acero de grano fino St E460 o St E355 según DIN 17124, y St 550/570 que va a depender del tipo de uso que se la va a dar al anclaje. En la fabricación el acero es compactado mediante transformación y laminación en frío, sin pérdida de material, dando un aumento en su carga en el límite elástico. Este procedimiento garantiza las características técnicas.

- La sección del anclaje TITAN se calcula a base del peso real.
- La tensión de fluencia y la tensión de rotura se calcula a base de las cargas de tensión y rotura.

Para obtener la carga de fluencia admisible, se emplea un factor de seguridad de 1.75.

II.4.4.2 Acero – cemento

A la superficie de los micropilotes tubulares, ya conocidas sus propiedades intrínsecas superiores a la de las barras macizas de acero con la misma sección, se le diseñó una rosca especial, que cumple con la norma DIN 488 para armaduras de hormigón. Esto es similar al desarrollo de los aceros de armaduras del hormigón, dejando de ser lisas a corrugadas.

II.4.4.3 Característica de la rosca

Su forma especial limita el ancho y distribución de las fisuras de cemento circundante, lo que provoca una distribución homogénea de la misma, lo cual da a la vez protección suficiente al acero de la corrosión. Se garantiza el recubrimiento con los espaciadores. Las roscas se definen por la superficie de los nervios (hilo) f_R (dan distribución uniforme del cemento) de referencia:

$$f_R = \frac{\text{altura de nervios}}{\text{distancia entre nervios}}$$

Una unión-contacto óptima entre tubo, cuerpo de inyección y suelo bajo cargas normales y de corte simultáneas puede obtenerse solamente cuando se forman articulaciones plásticas en el acero conforme con las zonas fisuradas en el cuerpo inyectado, permitiendo así una rotación máxima sin volverse frágil.

Tabla II.5 Especificaciones técnicas de las barras TITAN (Documento Ischebeck, 2008)

	Ud.	TITAN 30/16	TITAN 30/11	TITAN 40/20	TITAN 40/16	TITAN 52/26	TITAN 73/53	TITAN 73/56	TITAN 73/45	TITAN 73/35	TITAN 103/78	TITAN 127/108 *	TITAN 103/51
Diám. exterior	mm	30	30	40	40	52	73	73	73	73	103	127	103
Diám. interior	mm	16	11	20	16	26	53	56	45	35	78	108	51
Sección	mm ²	382	446	726	879	1.337	1.631	1.414	2.260	2.710	3.146	3.332	5.501
Carga rotura	T	22	32	53,9	66	92,9	116	119,4	163	198	228,2	240	346
Carga en el límite elástico	T	18	26	43	52,5	73	97	78,5	118	135,5	180	181.	275
Tensión fluencia T _{0.2}	Kg/cm ²	4.700	5.800	5.900	5.900	5.500	5.900	5.500	5.100	5.000	5.700	6.000	5.000
Peso	Kg/m	2,7	3,29	5,6	7,0	9,83	12,24	11,0	17,8	17,8	24,70	27,5	43,4
Long. standard	m	2/3/4	2/3/4	1,5/3	1,5/3	3	3	6,25	3	3	3	6	3
Bocas de perforación disponibles													
Roca, terreno duro o de gravas y bolos	mm	42, 46, 51, 55, 90	42, 46, 51, 55, 90	70, 90, 100, 115	70, 90, 100, 115,	115, 130	130, 175	130, 175	130, 175	130, 175	175	200	175
Terreno blando, arcillas, limos, arenas....	mm	75, 95	75,95	110,150	110,150	130, 175	200	200	200	200	220, 280	220	220, 280

II.4.4.3 Cuerpo inyectado – terreno

Utiliza cemento en la auto-perforación con inyección simultánea que sirve como fluido de lavado-barrido y como estabilizador de la perforación, la presión de inyección utilizada es de 5 – 10 kg/cm² (5.1 – 10.2 bar), la mezcla de lechada de cemento se distribuye e infiltra entre las partículas y cavidades del terreno, lo que forma una pátina (capa fina). Al emplear la rotoperforación se produce una mejora del suelo alrededor de la perforación. Llegando a un aumento del 30% en el valor del SPT obtenido inicialmente según la Empresa Delft Geotechnics de Holanda.

Al observar la sección transversal de un cuerpo inyectado (excavado), se distinguen 3 capas concéntricas distintas:

- una capa circundante de terreno mejorado, (primera capa);
- una inyección primaria de terreno saturado de cemento y, (segunda capa);
- inyección secundaria final de cemento, (tercera capa).

El diámetro final que se obtiene es distinto al diámetro nominal inicial de la perforación (de la boca de la perforación BP) del cuerpo inyectado.

Para los distintos tipos de suelos se obtiene:

Diámetro	Suelo
2 x BP	gravas y bolones de gran tamaño
1.5 x BP	arenas y gravas
1.4 x BP	arcillas, limos y margas
1.2 x BP	rocas disgregadas o blandas
1.0 x BP	rocas duras y sanas

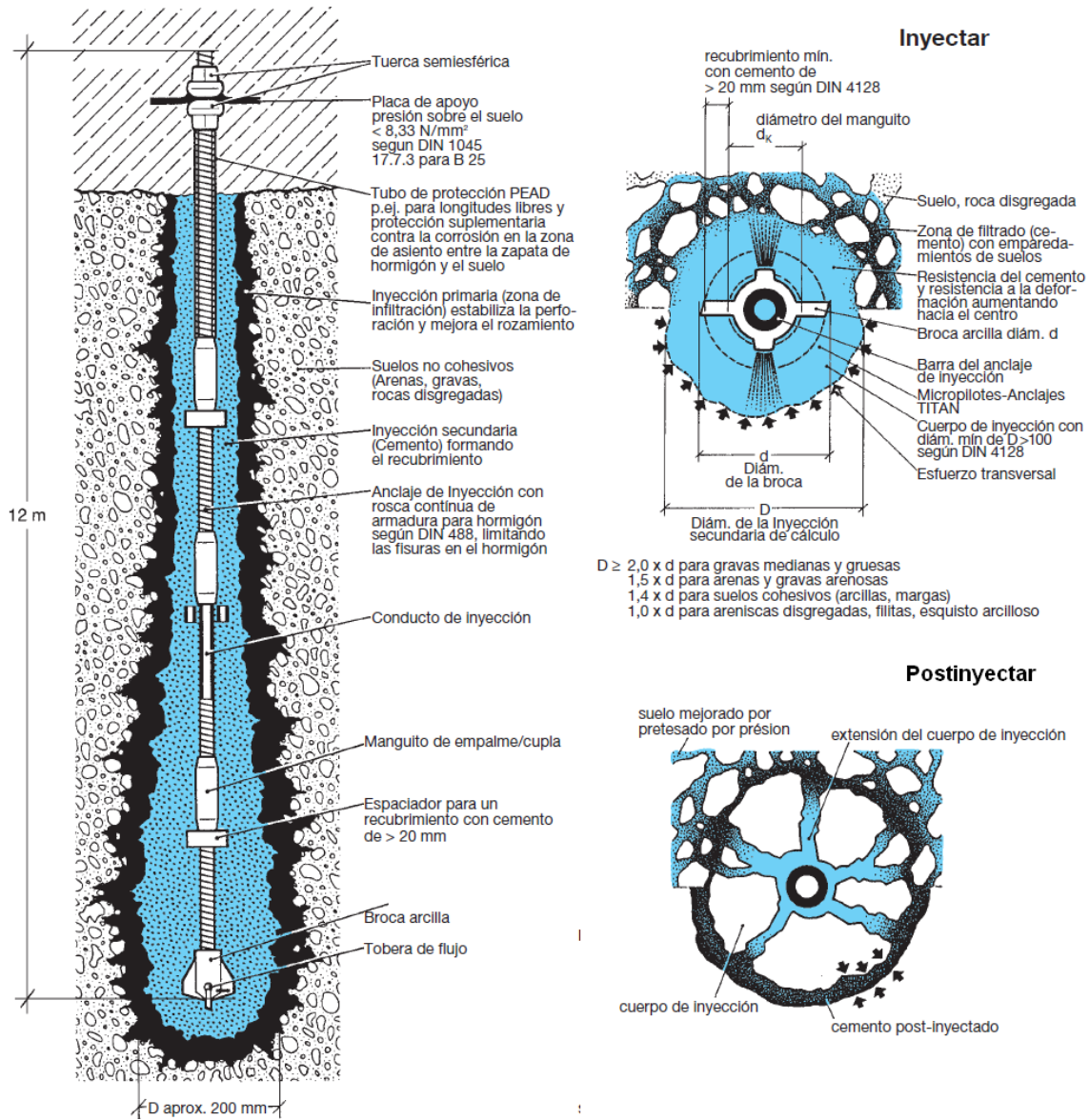


Figura II.12 Detalle de interacción barra acero - cemento - suelo (Documento Ischebeck, 1999)

En la Figura II.12 se nombra y describe las partes del micropilote inyectado en el terreno, además de visualizar las distintas capas que se forman entre la lechada de cemento y el terreno.

Al terminar el proceso de perforación, la rotación de la broca se mantiene sin avance, con una lechada de cemento A/C = 0.4, teniendo la perforación abierta sin obturación, la presión va en aumento dependiendo del tipo de terreno entre 10 – 20 bar. Esto es debido a que se inicia un fraguado rápido del cemento, lo que forma unas glebas (terrón, trozos) que se desprenden y encajan alrededor, creando un obturador natural que hace aumentar la presión: A este procedimiento se le denomina "Inyección Dinámica", frente a la inyección estática de los micropilotes IGU tradicionales. A esta operación en el lenguaje de los sondajistas se le llama "*perforar hasta el bloque de rotación*", este procedimiento hace que la post-inyección o re-inyección sea menos efectiva.

II.4.4.5 Capacidad de carga externa

Para determinar la dimensión del diámetro D del cuerpo inyectado y la longitud L de la zona de transmisión de cargas es determinante conocer la capacidad de carga externa, que tiene en cuenta el factor de roce q_{sk} , la superficie de inyección en el suelo y el factor de seguridad S según DIN 4128 Tabla II.2.

La resistencia en la punta de micropilotes TITAN es despreciable.

Para los valores de roce superiores, si no se han podido determinar por la homologación de suelos parecidos o por ensayos previos, se obtienen a través de los valores de roce q_{sk} para presión y tracción según DIN V 1054-100 tabla F1 como sigue:

Tabla II.6 Tabla F1 DIN V 1054-100

Suelo	Rozamiento q_{sk}	
	MPa	kN/mm ²
grava mediana y gruesa	0.2	200
arenas y gravas arenosas	0.15	150
suelos cohesivos	0.10	100

¹⁾ $D \geq 0,4$ resp. $q_{ck} \geq 10$ MN/m²
²⁾ $I_c \approx 1,0$ resp. $C_{uk} \geq 100$ kN/m²

La comprobación de la seguridad contra el pandeo de los Micropilotes TITAN se debe calcular según DIN 4128 9.3 solamente cuando la resistencia al corte no drenado del suelo es $C_u < 10$ kN/m².

II.5 Aplicaciones de raíces de micropilotes R.P.R.

A continuación se presentan ejemplos de aplicación de micropilotes, propuestos por Lizzi (1952). En la Figura II.13 se muestra algunas de las principales aplicaciones de R.P.R. en estructuras.

Figura 1: Indica el esquema de un muro de contención de gravedad, dirigido a la protección de la estabilidad de una construcción, cerca de una excavación al aire libre que se lleve a cabo. La gravedad es suministrada por el suelo, mientras que las líneas de resistencia son suministradas por los micropilotes. La estructura se puede construir en cualquier tipo de suelo. No importa su heterogeneidad, la presencia de obstáculos, bloques etc. Esta fue la primera aplicación exitosa de R.P.R.

Figura 2: Es mostrado el esquema utilizado para la protección de edificios durante la construcción de túneles en el subsuelo. Los R.P.R. muros de contención intentan la prevención de la extensión de la descompresión, inducida por el túnel, desde la zona A hacia la zona B, bajo la edificación.

Figura 3: se muestra el esquema para la prevención de un deslizamiento de terreno en una formación de semi-roca. El modelo R.P.R. destinado a abarcar toda la zona de deslizamiento y proporcionar un "anclado" en las posibles superficies críticas.

Figura 4: se muestra el caso de prevención de deslizamiento de tierra en suelo suelto. En tal caso es preferible concentrar la resistencia en típicos muros de gravedad, tal como se muestra en la Fig. 1 y 2.

Figura 5: indica el esquema de apuntalamiento de una estructura alta tal como en torres Minarets (en ocasiones inclinadas), etc. En adición al completo desempeño del apuntalamiento de los "pali radice" el reticulado modelo adoptado, en tal caso conduce a la formación de un sólido basamento suelo/pilote, gravimétricamente asociado a la torre como única estructura profundamente arraigada en el suelo; la estabilidad de las torres es en tanto, en gran parte incrementada.

Figura 6: indica el reforzamiento algunas veces utilizado por túneles, excavados en formaciones de arcilla suelta, después de la construcción, produce peligrosas deformaciones. Los R.P.R. de reforzamientos tienen como objetivo realizar algún tipo de refuerzo suelo/pilote adicional al arco; al mismo tiempo, suministrar, en el revestimiento de hormigón, un punto fijo resistente a la compresión, así como a las fuerzas de tracción. Esto no es un "anclaje" en el sentido normal, como se utiliza en formaciones rocosas, por el contrario, es un ejemplo típico de "suelo reforzado".

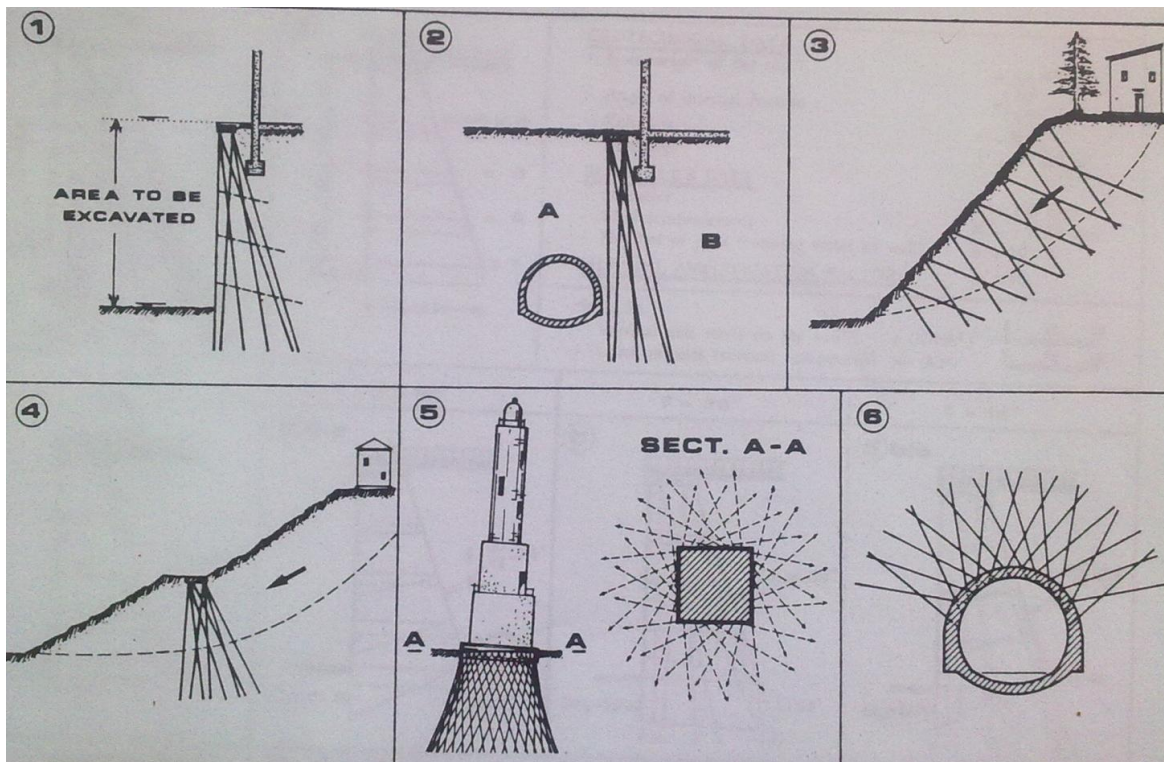


Figura II.13 Aplicaciones de R.P.R. no a escala (Lizzi, 1952)

Para un R.P.R. de muro de gravedad, además de las características de mecánica del suelo, hay varios otros aspectos que participan en diferentes problemas geotécnicos, tales como el módulo de elasticidad o la compresibilidad del suelo, el coeficiente de balasto, la resistencia de los pilotes a cargas lateral, el empuje del suelo, etc. Cada uno de estos aspectos muestra grandes posibilidades de variación, cuando se combinan en un solo problema, resultados muy dispersos son de esperar, por lo tanto la fiabilidad de las conclusiones no se puede evaluar.

Los cálculos computacionales en estos problemas son de gran ayuda, ya que proveen un grupo de posibles soluciones y no única solución buscada.

II.6 Utilización de micropilotes en Chile

II.6.1 Proyecto: Enlaces 5, 6 y 7 Puente Llacolén sobre el río Biobío

II.6.1.1 Descripción

Dentro del Proyecto de Mejoramiento Vial de Concepción, se ejecutaron los pasos inferiores ENLACE 5 (puente Ferroviario), 6 (cerro Chepe) y 7. Para el diseño de la losa inferior de estos pasos bajo nivel, se debía considerar la subpresión hidrostática producto de la posición relativa entre la napa freática y la cota de la rasante.

Para contrarrestar la subpresión, se proyectaron micropilotes en reemplazo de la solución original, consistente en una losa sándwich pesada, la cual obligaba a una mayor profundidad de excavación y por lo tanto mayor costo de la estructura de contención (pantalla + anclajes). La solución consistió en anclar la losa al terreno mediante micropilotes Titan inyectados.



Figura II.14 ENLACE N°6 – Cerro Chepe, ruta 160 Concepción
(Documento Terratest, 2006)

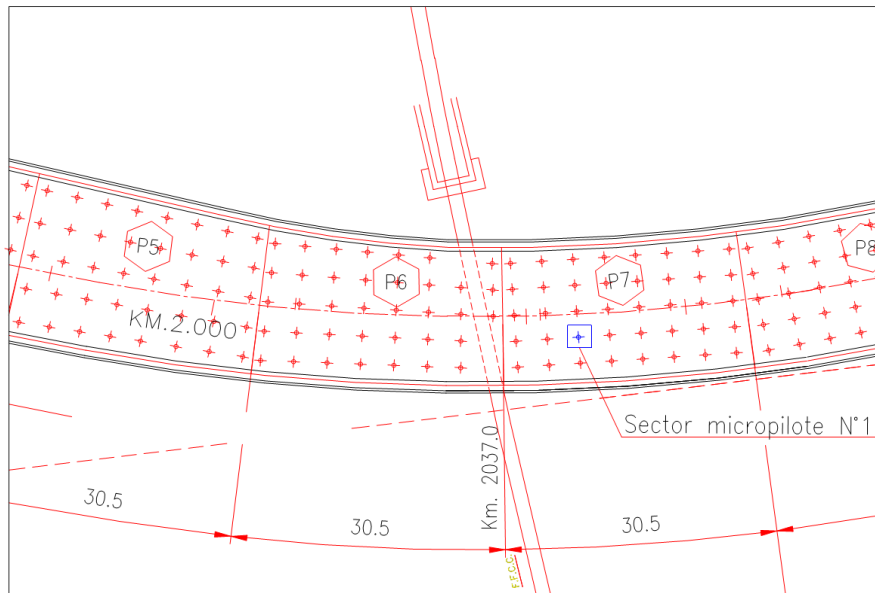


Figura II.15 Vista en planta de una sección de la losa y disposición de micropilotes ENLACE 6 (Documento Terratest, 2006)



Figura II.16 Ejecución 279 Micropilotes ISCHEBECK 73/53 Long. Entre 6.00 y 9.00 m (Documento Terratest, 2006)

Los micropilotes empleados fueron del tipo TITAN 30/11, 40/16, 52/26 y 73/53, utilizados como pilotes de tracción para la absorción del empuje vertical generado por la subpresión sobre la losa. Se efectuaron ensayos de aptitud de manera de corroborar las hipótesis de diseño adoptadas.

Datos de obra

- Longitud de bulbo entre 8.00 m a 10.00 m
- 1740 ml de micropilotes Titan 40/16 ($F_{adm} = 300 \text{ kN}$)
- 2900 ml de micropilotes Titan 73/53 ($F_{adm} = 554 \text{ kN}$)
- 540 ml de micropilotes Titan 52/26 ($F_{adm} = 400 \text{ kN}$)
- 300 ml de micropilotes Titan 30/11 ($F_{adm} = 150 \text{ kN}$)

II.6.1.2 Prueba de carga a tracción

Los ensayos efectuados fueron ejecutados de acuerdo a la Norma DIN 4125, bajo la categoría de Ensayos de Aptitud. En cada uno de estos ensayos, el micropilote es llevado a la carga de rotura de la interfaz suelo – bulbo o bien hasta alcanzar la capacidad de fluencia de la sección de acero del micropilote.

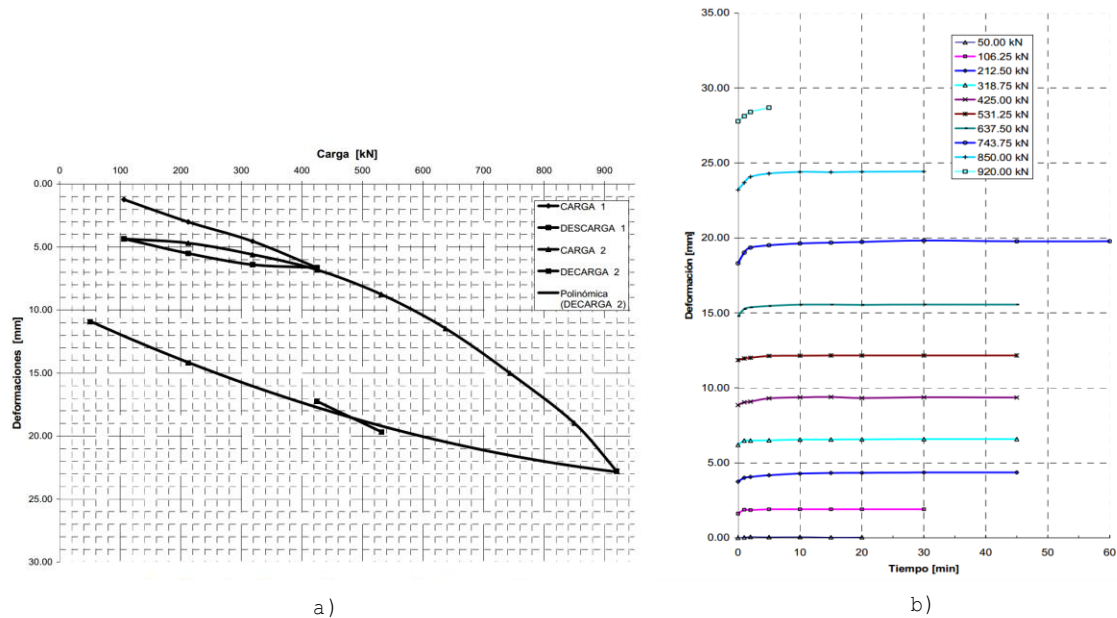


Figura II.17 a) Curva carga – deformación, ensayo micropilote $L_v = 10.70 \text{ m}$. Enlace N°6; b) Curva deformación - tiempo, ensayo $L_v = 10.70 \text{ m}$. Enlace N°6 (Documento Terratest, 2006)

Se efectúa registro de la carga aplicada y la deformación que experimenta el micropilote. De esta manera se puede conocer el comportamiento carga v/s deformación, además de verificar los criterios de creep (fluencia bajo carga constante) que experimenta el micropilote, para así garantizar que los lineamientos adoptados en el diseño se cumplen o bien es necesaria una modificación de éstos en base a los resultados obtenidos de estos ensayos de investigación.

Las verificaciones que se deben realizar para el diseño de los micropilotes son:

1. Longitud necesaria por fricción lateral a lo largo del fuste (interface bulbo-suelo).
2. Longitud necesaria por arrancamiento global (cono de arrancamiento). Esta verificación se realiza con cuerpos de arrancamiento troncocónicos, los que dan resultados más reales que los cónicos y que se han verificado en ensayos.



Figura II.18 Estructura de ensayo de carga a tracción, detalle de ubicación de diales comparadores y celda de carga en gato hidráulico (Documento Terratest, 2006)

Enlace Nº 5

Para la construcción del Paso Inferior "Enlace 5" en Concepción, se usaron las técnicas de muro pantalla, anclajes y micropilotes.

La metodología constructiva consistió en la construcción del muro pantalla, pantalla plástica y barretes, luego los puentes viales y ferroviario a la par de la ejecución y tensado de los anclajes temporales en las alas del paso (todo desde el terreno natural), para luego dar inicio a la excavación a sello de losa de subpresión. Continúa la instalación de los micropilotes y finalmente construcción de la losa de subpresión.



Figura II.19 Etapa de excavación, bajo puente construido, hasta losa del paso inferior con depresión de napa freática (Documento Terratest, 2006)

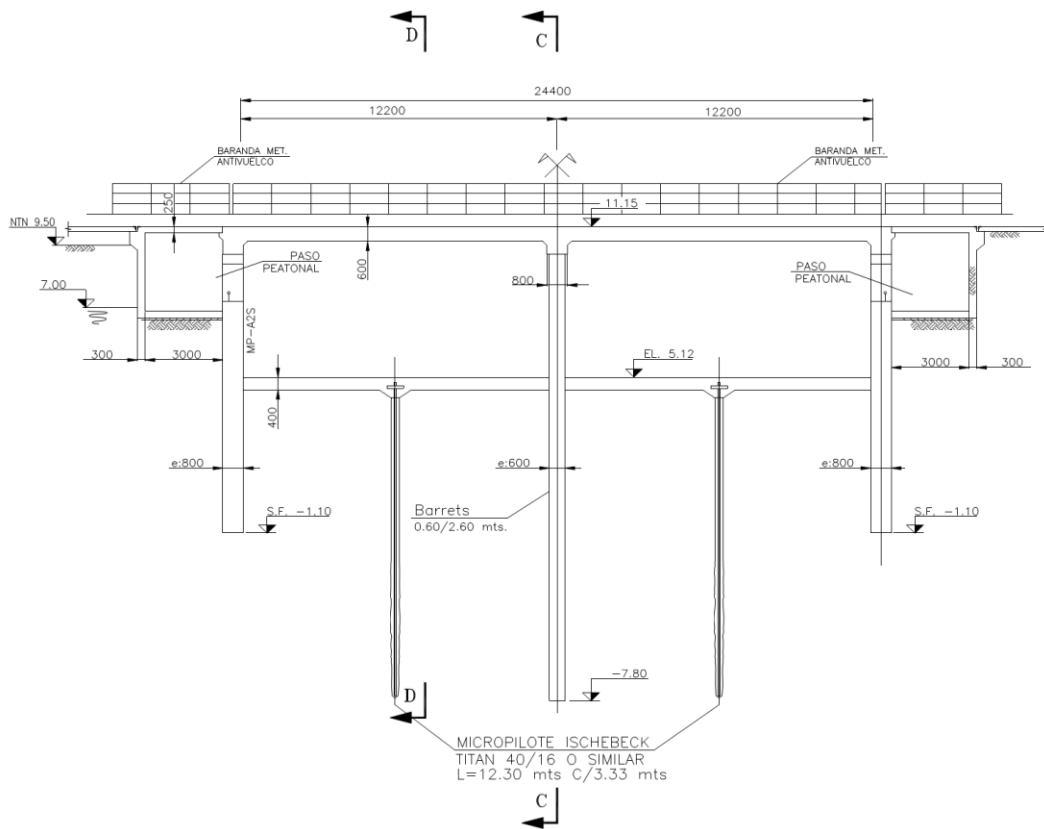


Figura II.20 Sección B-B transversal, Enlace 5 (Documento Terratest, 2006)

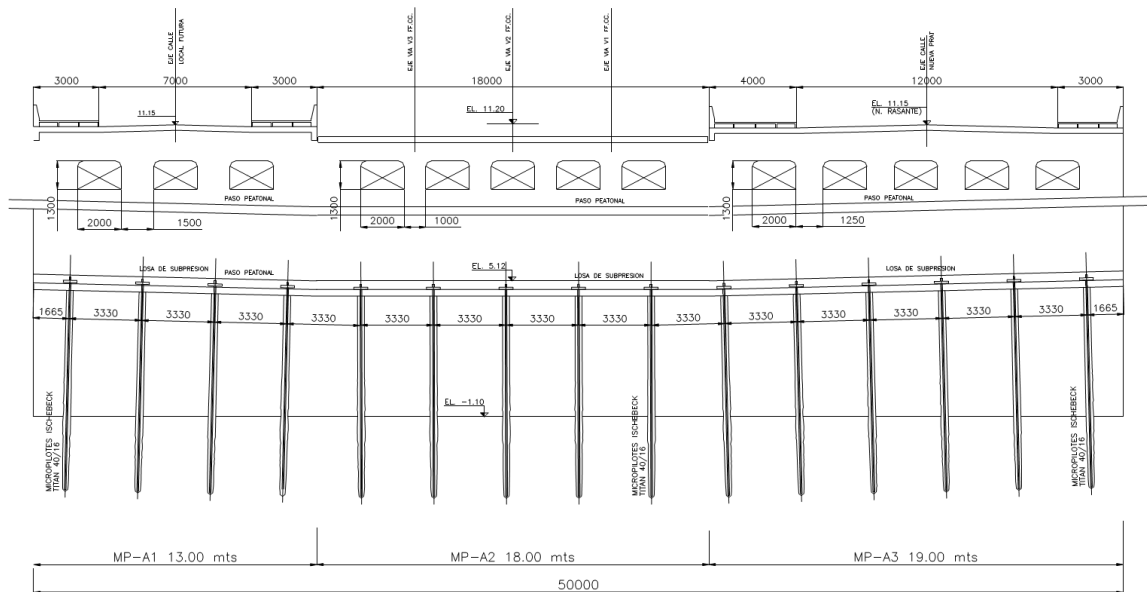


Figura II.21 Vista longitudinal Enlace 5 (Documento Terratest, 2006)

Capítulo III

DISEÑO DE MICROPILOTES

III.1 Métodos de cálculo

A continuación, se plantearán una síntesis de los distintos métodos para el cálculo y diseño de micropilotes propuestos por Lizzi en 1985 y Bustamante & Doix (1985).

III.1.1 Método tradicional de "Pali Radice"

El método de cálculo propuesto por Lizzi (1985) es el siguiente:

$$Q_{ult} = \pi \cdot D \cdot L \cdot K \cdot I \quad [III.1]$$

donde,

- Q_{ult} : carga última del pali radice a compresión;
- D : diámetro nominal (de perforación);
- L : longitud;
- K : coeficiente que representa el rozamiento por el fuste;
- I : coeficiente adimensional que depende del diámetro.

Tabla III.1 Coeficientes de la fórmula de Lizzi (1985)

SUELO	K kPa	DIAMETRO cm	I
blando	50	10	1,00
suelto	100	15	0,90
de compacidad media	150	20	0,85
muy compacto, grava, arena	200	25	0,80

Valor de la resistencia por fuste K

Valor del coeficiente I

Con el método se desprecia la resistencia por la punta y la resistencia por el fuste utilizada puede exceder del valor máximo que suele admitirse para los pilotes convencionales, que es de 100 kPa. La diferencia es despreciada (achacada) por Lizzi al contacto estrecho entre pilote-suelo y al diámetro real, mayor que el nominal. Con este método se ha calculado la gran mayoría de las raíces de pilotes o "pali radice".

III.1.2 Método francés

Bustamante & Doix (1985), proponen un método específico para el cálculo de los anclajes (tirantes) y micropilotes inyectados, tras numerosos ensayos en terreno. A continuación se presenta un resumen de la publicación realizada enfocada al caso de suelo y micropilote.

III.1.2.1 Generalidades de dimensionamiento

Después de determinar para un anclaje la dirección y el valor de la tensión de tracción servicio T_A inducida por la estructura, el diseñador debe dimensionar las diferentes partes del anclaje, a saber:

- la sección de acero refuerzos S_a ,
- la longitud libre L_L ,
- la profundidad de empotramiento (bulbo) L_S .

Estas partes se muestran en la figura III.1a que, sin la llamada longitud libre L_L , dirigido naturalmente al diagrama de micropilote inyectados, que se muestra en la Figura III.1b.

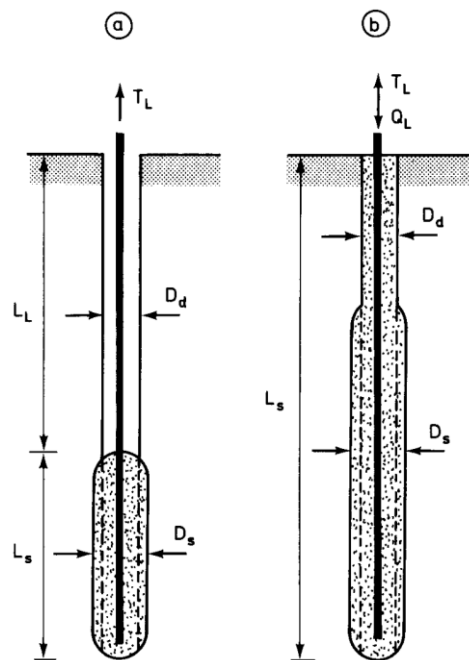


Figura III.1 Representación esquemática de un tirante (a) y de un micropilote (b) (Bustamante et al, 1985)

El tipo y grado de acero que constituirá el refuerzo se seleccionará, con el cálculo de la sección S_a requerida. Simplemente se aminora la carga de trabajo correspondiente al límite elástico convencional T_G .

En el caso de anclaje, y de acuerdo a su tipo, se adoptarán de conformidad con las recomendaciones del último documento TA 85:

- $T_A \leq 0.75 \cdot T_G$ para anclajes provisorios, y
- $T_A \leq 0.60 \cdot T_G$ para anclajes permanentes.

T_G es la fuerza de tracción correspondiente al límite elástico del refuerzo del anclaje ($T_G = A_s \cdot f_y$).

Los micropilotes, y conforme a las directivas del documento DTU 13.2, se verifica que:

- $T_A \leq 2/3 \cdot T_G$ para las solicitaciones de 1^{er} genero, y
- $T_A \leq 0.5 \cdot T_G$ para las solicitaciones de 2^{do} genero.

con T_G como se define para los anclajes.

III.1.2.2 Cálculo de la longitud de sellado L_s

Para que el bulbo de sellado desempeñe su función, tanto para un anclaje como para un micropilote, hace falta en primer lugar que los aceros no puedan deslizarse dentro de la lechada.

Es conveniente no efectuar a este nivel ninguna comprobación ya que las lechadas habitualmente utilizadas ofrecen adherencias acero-cemento de 1 a 2 MPa, y que se amplifica mecánicamente por el corrugado de las barras y el cableado del hilo. Además, la ondulación de los paquetes de los hilos o cables trenzados y la curvatura eventual de las perforaciones vienen para perfeccionar el enlace de aceros y lechada.

En cuanto a la determinación de la longitud de enlace con el terreno, L_s , el método propuesto tiene en cuenta las conclusiones de los estudios sobre el mecanismo de movilización de los esfuerzos a lo largo del sellado y del mecanismo de falla, o con más precisión de descalce, se debe saber, que el desprendimiento de una fundación inyectada también es resultado de la aparición en contacto del bulbo con una superficie de deslizamiento sobre la totalidad, de la cual la fricción lateral llegó a su valor límite.

Basándose en estas consideraciones, se propone para el cálculo de L_s la fórmula general:

$$T_L = \pi \cdot D_s \cdot L_s \cdot q_s \quad [\text{III.2}]$$

donde

- T_L : tracción límite del anclaje o del micropilote aislado,
- D_s : diámetro medio del bulbo de sellado (Fig. III.1),
- q_s : fricción lateral límite unitaria ejercida a lo largo de la superficie lateral del bulbo.

El valor D_s depende en primer lugar del diámetro de perforación D_d pero también de la naturaleza y de la compacidad del suelo y del modo de sellado, IRS o IGU, que se recurre. Este valor es tomado como

$$D_s = \alpha \cdot D_d \quad [\text{III.3}]$$

introduciendo un coeficiente amplificador α cuyos valores se dan en la Tabla III.3. Los valores de la fricción lateral unitario límite q_s , dependen de la naturaleza del suelo, de su consistencia o compacidad y desde luego el modo de inyección escogido (IRS o IGU) para realizar los anclajes o micropilotes. Estos valores son dados por las gráficas de las Figuras III.2 y III.3, a los cuales se efectúa allí de asociar la Tabla III.3 para efectuar las elecciones que se imponen.

Tabla III.2 Valores de los coeficientes α para calcular el diámetro medio de sellado de un micropilote o tirante (anclaje) inyectado (Bustamante & Doix, 1985)

SUELO	Coeficiente α		Cuantía mínima de lechada recomendable V_i
	IRS*	IGU**	
Grava	1,8	1,3 a 1,4	1,5 V_s^*
Grava arenosa	1,6 a 1,8	1,2 a 1,4	1,5 V_s^*
Arena con grava	1,5 a 1,6	1,2 a 1,3	1,5 V_s^*
Arena gruesa	1,4 a 1,5	1,1 a 1,2	1,5 V_s^*
Arena mediana	1,4 a 1,5	1,1 a 1,2	1,5 V_s^*
Arena fina	1,4 a 1,5	1,1 a 1,2	1,5 V_s^*
Arena limosa	1,4 a 1,5	1,1 a 1,2	1,5 a 2 V_s para IRS 1,5 V_s para IGU
Limo	1,4 a 1,6	1,1 a 1,2	2 V_s para IRS 1,5 V_s para IGU
Arcilla	1,8 a 2	1,2	2,5 a 3 V_s para IRS 1,5 a 2 V_s para IGU

V_s : volumen de bulbo de sellado
 IRS: inyección repetitiva y selectiva
 IGU: inyección global unificada

* : para $p_1 \geq p_1$
 ** : para $0,5 p_1 < p_1 < p_1$

Tabla III.3 Tabla para la elección de ábacos de cálculo de frotamiento lateral unitario limite q_s (Bustamante & Doix, 1985)

Suelo	Modo de inyección	
	IRS *	IGU **
Grava	SG.1	SG.2
Grava arenosa		
Arena gravosa		
Arena gruesa		
Arena media		
Arena fina		
Arena limosa	AL.1	AL.2
Limo		
Arcilla		
* : con $p_1 \geq p_1$		** : con $0.5 p_1 < p_1 < p_1$

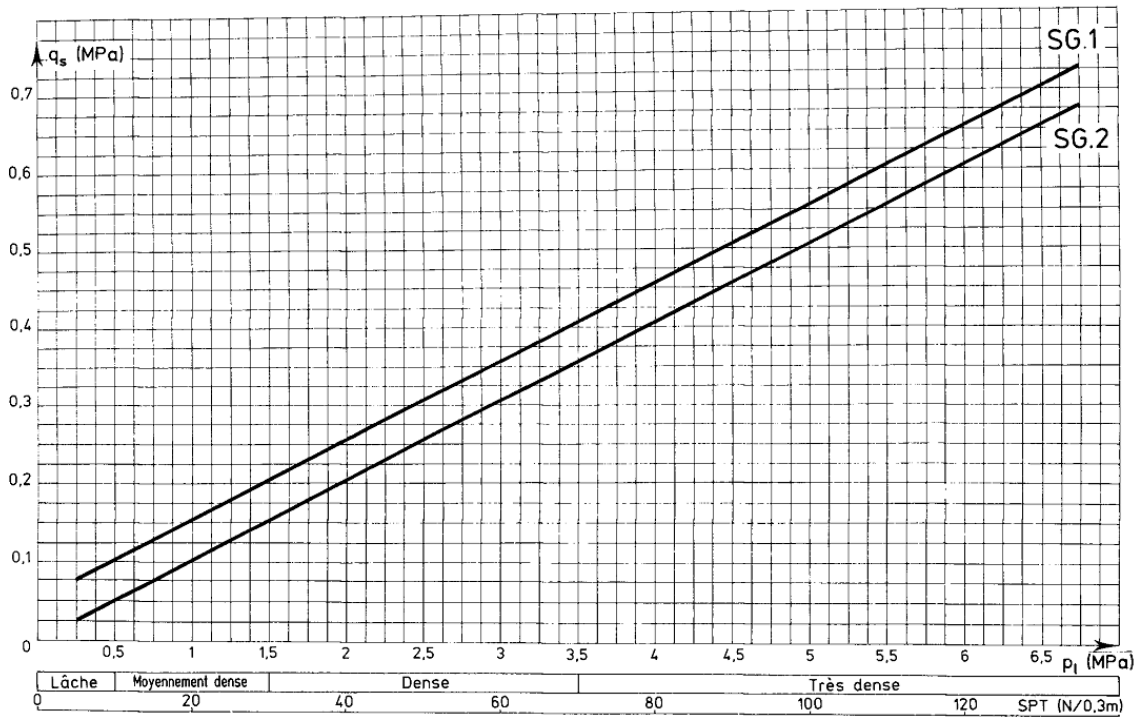


Fig. 16. — Abaques pour le calcul de q_s pour les sables et gravas.

Figura III.2 Abacos para el cálculo de q_s en arenas y gravas (Bustamante & Doix, 1985)

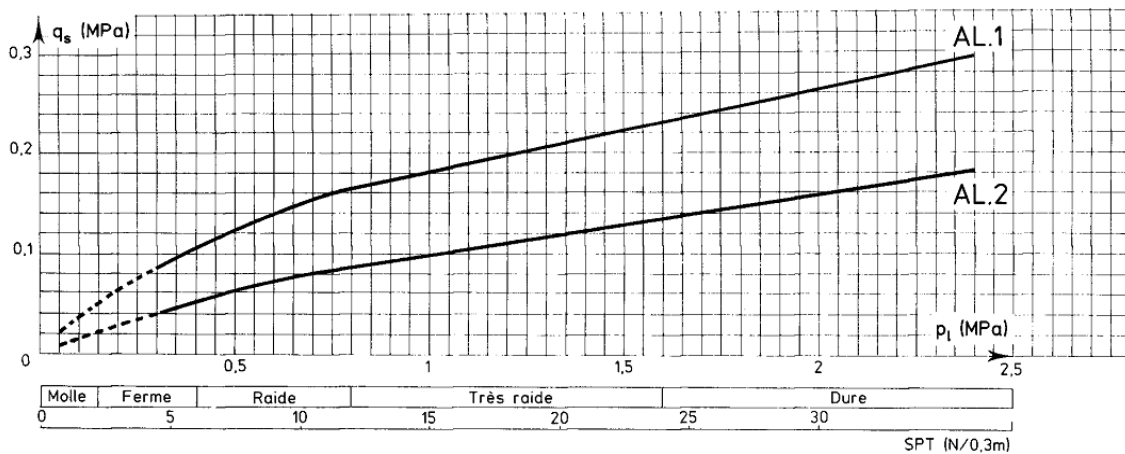


Fig. 17. — Abaques pour le calcul de q_s pour les argiles et limons.

Figura III.3 Abacos para el cálculo de q_s en arcillas y limos (Bustamante & Doix, 1985)

Cuando el sellado de un anclaje o de un micropilote L_s se extiende sobre varios estratos, aunque la configuración que prevale en la mayoría de los casos sea de estrato único, se tendrá en cuenta, al nivel del cálculo de los valores q_{si} , cada uno de los estratos interesados. Esto equivale escrito, como habitualmente se hace por otra parte para los pilotes:

$$T_L = \sum_i \pi \cdot D_{si} \cdot q_{si} \cdot l_{si} \quad [\text{III.4}]$$

con

l_{si} : longitud de bulbo sellado en la capa i , como indicado sobre la Figura III.4 (o $i = 1, 2$ o 3).

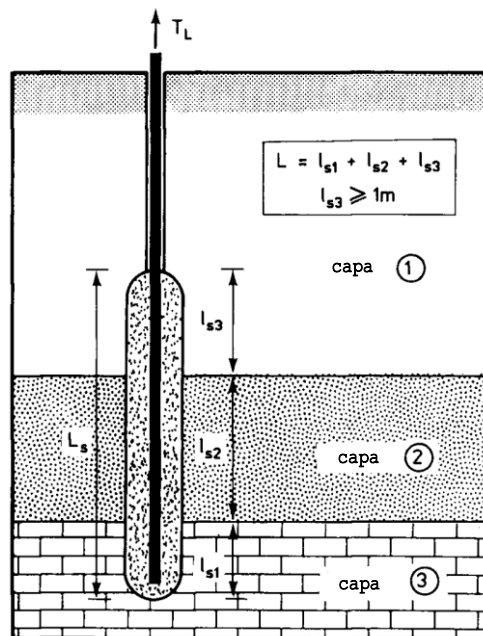


Figura III.44 Representación esquemática de un anclaje sellado en múltiples capas, y la condición de longitud mínima de la última capa (Bustamante et al, 1985).

III.1.2.3 Cálculo de micropilotes sometidos a cargas de compresión

Hemos visto que el método de cálculo establecido aplica a los anclajes como micropilotes en tensión. Es posible adaptar el cálculo de micropilotes solicitados en compresión, sujeto a tener en cuenta la resistencia ofrecida por la punta.

Por analogía con la bien conocida fórmula reservada para los pilotes, se escribe:

$$Q_L = Q_L^P + Q_L^S \quad [III.5]$$

con

- Q_L : carga límite, en la cabeza del micropilote,
- Q_L^P : resistencia límite en la punta del micropilote,
- Q_L^S : fricción límite a lo largo del bulbo de sellado.

Considerando que, para un sellado inyectado, el valor de fricción lateral movilizable bajo tracción es igual al valor movilizable en el momento de la carga, se obtiene:

$$Q_L^S = T_L \quad [III.6]$$

Así, el término Q_L^S puede ser calculado de forma directa a partir de los gráficos q_s de las Figuras III.2 y III.3 y de las instrucciones de las Tablas III.2 y III.3 asociadas, todo teniendo en cuenta las observaciones formuladas en los párrafos IV.3 y IV.4 del documento original (Bustamante, 1985).

La resistencia de punta Q_L^P , no excede en general del 15 al 20% del término de fricción lateral, se puede calcular a una tasa fija para la práctica actual por la aplicación de la regla simplificada;

$$Q_L^P = 0,15 \cdot Q_L^S \quad [III.7]$$

Cuando se deseara para casos particulares precisar el cálculo del mismo término, podremos recurrir a la fórmula recomendada para los pilotes:

$$Q_L^P = S_p \cdot k_p \cdot P_i \quad [III.8]$$

donde

- S_p : sección de la punta del bulbo de sellado de diámetro D_s , calculado como para los anclajes (ver § III.2.2.2), si la ejecución garantiza efectivamente a este nivel un aumento de diámetro de perforación D_d ,
- K_p : factor de capacidad de carga de la punta, tomada igual a:
 - 1,2 para las arenas y gravas,
 - 1,6 para las arcillas,
 - 1,8 para las arcillas y las margas,
 - 1,5 para la roca alterada y fragmentada,
- p_1 : presión límite del suelo bajo la punta medido del presiómetro de Ménard

Por fin, cuando se cumplen ciertas condiciones, relacionadas con la configuración de las capas (presencia de suelos intercalados mediocres: arenas finas, suelta y cenagosas, arcillas muy blandas, etc.) o a la geometría del micropilote (esbeltez muy importante), no olvidaremos para las cargas elevadas verificar la realización de pandeo del eje.

III.1.2.5 Elección del coeficiente de seguridad

A partir de la tracción o carga límite T_L o Q_L , se propone calcular los valores de servicio (o admisibles) correspondientes, es decir T_A y Q_A , mediante la aplicación de factores de seguridad FS, que figuran en la Tabla III.4.

Tabla III.4 Valores de coeficientes de seguridad aplicables para el cálculo de anclajes y tirantes inyectados (Bustamante & Doix, 1985)

Tipo de fundación inyectada	Duración de la utilización	Valor de coeficiente de seguridad FS	
		arrancamiento	compresión
Anclaje	provisorio	1.8	-
	permanente	2.0	-
Micropilote	provisorio	2.0	1.8
	permanente	2.2	2.0

Capítulo IV

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN FOREVER

IV.1 Introducción

El Proyecto de Investigación Nacional Francés sobre Micropilotes, 'FOREVER' (FOundation REinforced VERTically), es una operación de RGPU, redes de ingenieros civiles y urbanos del Ministerio Francés a cargo de Obras Públicas, se llevó a cabo desde 1993 a 2001. Fue principalmente experimental y los resultados fueron obtenidos de modelos de ensayos en arena (cámaras de calibración, tanques experimentales y centrífuga) y de ensayos a escala real (sitios de arena experimental, así como en los lugares de trabajo reales), ver por ejemplo Plumelle et al. (2001).

El comportamiento sobre un grupo vertical de micropilotes y sobre redes de micropilotes fue estudiado bajo cargas verticales y horizontales, la mayoría en arenas. El positivo efecto de grupo es observado con un gran número de delgados micropilotes y uno negativo con un pequeño número. La predicción de los desplazamientos de tales grupos también ha sido investigada utilizando métodos de t-z y p-y. Redes de micropilotes parecen soportar cargas laterales mejor que al equivalente de grupo de micropilotes.

El libro FOREVER incluye 5 capítulos. A continuación, se presentan solo cargas estáticas sobre grupos y redes. No obstante, las recomendaciones a partir del proyecto FOREVER son dadas tanto para cargas estáticas y sísmicas (FOREVER, 2008).

IV.2 Comportamiento elemental de micropilotes

IV.2.1. Comportamiento experimental bajo carga axial

Debido a su pequeño diámetro y gran relación de esbeltez. Se deduce que bajo carga axial, el comportamiento de un micropilote, se rige principalmente por la fricción lateral que se desarrolla a lo largo del fuste. La resistencia de punta es por lo general insignificante. El mecanismo de desarrollo de la fricción lateral en una prueba de carga axial en micropilote, se puede demostrar de forma experimental midiendo la deformación de compresión distribuida desde la cabeza hasta la punta del micropilote. Para esto se utiliza, un extensómetro.

La Figura IV.1 muestra la distribución de las deformaciones locales en el micropilote ($\epsilon = \Delta l/l$) en función a la profundidad. Esto fue medido a través de extensómetro removible bajo una carga axial en el micropilote.

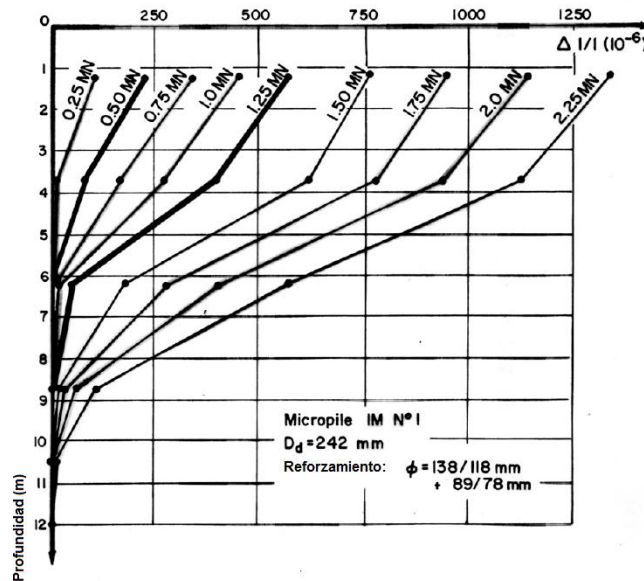


Figura IV.1 Curva de deformación axial por compresión en micropilote en función de la carga aplicada en la cabeza durante un ensayo de carga (Bustamante, 1985)

Asumiendo que el micropilote mantiene el comportamiento elástico durante la carga (en la mayoría de los casos), la deformación por compresión $\epsilon(z)$, es proporcional a la carga $P(z)$:

$$P(z) = ES \cdot \epsilon(z) \quad [IV.1]$$

con ES : rigidez del micropilote. Las curvas de deformación por lo tanto, pueden ser correlacionadas con la de distribución de tensiones en el micropilote.

Cabe señalar que para cargas pequeñas, el micropilote sólo se comprimió en lo largo de una parte de su longitud. A medida que aumenta la carga aplicada, las partes tensionadas aumentaron y al mismo tiempo, las curvas de la distribución de la carga o el acortamiento a la cabeza del micropilote tienden a convertirse en lineal y paralelo en su parte superior. Progresivamente, la curva $\varepsilon(z)$ o $P(z)$ llega a la base del micropilote y, falla, esto consiste prácticamente sólo de partes lineales o de una simple parte lineal si el suelo es homogéneo.

IV.2.2 Análisis teórico

Un simple modelo teórico ayuda entender las fases observadas en la distribución de deformaciones o en la de carga en el micropilote, durante el experimento.

Considerar un micropilote de diámetro B , longitud L , y rigidez ES , instalado en suelo homogéneo. La resistencia de punta se considera despreciable.

La teoría de, movilización friccional del fuste, es un elemento importante que gobierna el comportamiento del micropilote. Se hace la suposición de una forma lineal elástico-perfectamente plástico, que se caracteriza por dos parámetros:

- k : pendiente de la parte lineal $\tau = k \cdot y$ donde y es el desplazamiento relativo del micropilote respecto al suelo a la profundidad z ;
- q_s : fricción lateral límite, con $q_s = k \cdot y_1$.

La ecuación diferencial de la carga axial $P(z)$ (o de la deformación por compresión $\varepsilon(z)$) en el micropilote se puede establecer considerando los 3 siguientes puntos:

- i. equilibrio local del micropilote, (Fig. IV.2 a),
- ii. elasticidad lineal del micropilote,
- iii. la ley de movilización de fricción lateral.

De donde se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$dP = -\tau \cdot \pi \cdot B \cdot dz$$

$$\varepsilon(z) = -\frac{dy}{dz} = \frac{P(z)}{ES} \quad [IV.2]$$

$$\begin{cases} \tau = k \cdot y & y \leq y_1 \\ \tau = q_s & y \geq y_1 \end{cases}$$

y en combinación de la siguiente ecuación diferencial: $\frac{d^2P}{dz^2} - \frac{P}{\lambda^2} = 0$ con $\lambda = \sqrt{\frac{ES}{k \cdot \pi \cdot B}}$ llamada, "longitud de referencia efectiva", válido hasta que no se alcance la fricción lateral límite q_s ($y \leq y_1$). De lo contrario, el esfuerzo $P(z)$ en el micropilote viene dado por:

$$\frac{dP}{dz} = -\pi \cdot B \cdot q_s \quad y \geq y_1 \quad [\text{IV.3}]$$

donde, las condiciones de borde son:

$$\begin{cases} P = P_0 & \text{para } z=0 \\ P = 0 & \text{para } z=L \end{cases}$$

Estas dos ecuaciones diferenciales dan como resultado en dos posibles casos de curvas de carga $P(z)$, dependiendo de la movilización de la fricción lateral límite, (es decir, si es menor que la fricción lateral límite en cualquier punto $y \leq y_1$ o si esto es alcanzado en la parte superior del micropilote definido por $0 \leq z \leq z_1$).

En el primer caso, la carga $P(z)$ viene dado por:

$$P(z) = P_0 \frac{\text{sh}\left(\frac{L-z}{\lambda}\right)}{\text{sh}\left(\frac{L}{\lambda}\right)} \quad [\text{IV.4}]$$

en el segundo caso, la carga $P(z)$ viene dado por:

$$\begin{cases} P(z) = P_0 \cdot -\pi \cdot B \cdot q_s \cdot z & \text{para } z \leq z_1 \\ P(z) = P_1 \frac{\text{sh}\left(\frac{L-z}{\lambda}\right)}{\text{sh}\left(\frac{L-z_1}{\lambda}\right)} & \text{para } z \geq z_1 \end{cases} \quad [\text{IV.5}]$$

Las condiciones de compatibilidad en el punto $z = z_1$ de las dos curvas correspondientes de la sección $y(z)$ permiten el cálculo de los parámetros P_1 y z_1 .

Se aprecia, el aumento del descenso de la fricción lateral desde la cabeza del micropilote, las curvas de carga $P(z)$ presentan una parte lineal y una parte curva, independiente de la carga en la cabeza (Fig. IV.2 b).

Sin embargo el análisis de la interacción del suelo-pilote, para el caso donde la fricción lateral límite no es alcanzado ($y \leq y_1$ a lo largo de todo el pilote), no produce una profundidad crítica por debajo de la cual el micropilote

no está tensionado. Esta profundidad no es rigurosa, pero más allá de una cierta "longitud efectiva" es directamente proporcional a λ y con el aumento de la carga aplicada P_0 y, la relación P/P_0 es lo suficientemente bajo que puede dejar de lado la fuerza transmitida al micropilote (Schlosser y Guilloux, 1981).

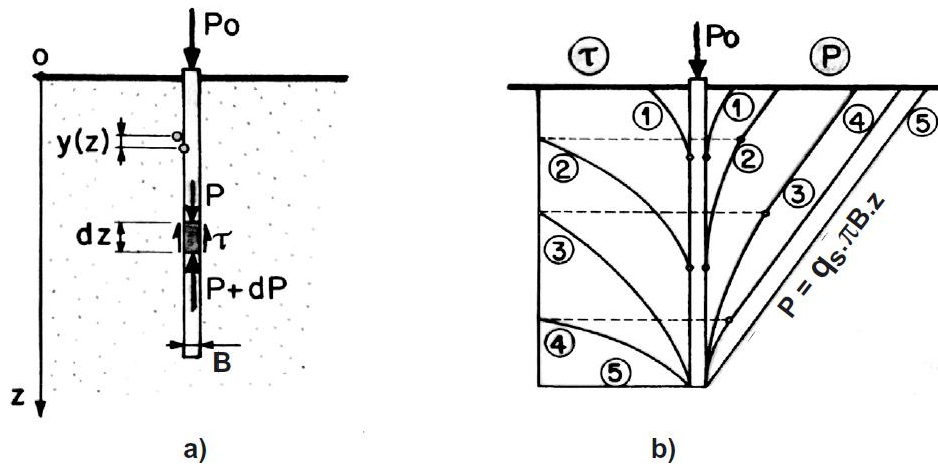


Figura IV.2 Modelo de un micropilote cargado para el modelo de interface de fricción suelo-micropilote (ley lineal-elástico perfecto plástico) (FOREVER, 2008)

La Figura IV.2b, ilustración de las diferentes etapas de carga del micropilote y como se moviliza la fricción del eje en la interface suelo-micropilote.

IV.3 Comportamiento bajo carga lateral

IV.3.1 Definición de diferentes tipos de esfuerzos laterales

Los micropilotes pueden ser cargados por fuerzas laterales, ya sea impartida a la cabeza o en cualquier punto a lo largo de su eje. Los ejes considerados para este tipo de estructura son convencionalmente coordenadas X e Y, con Z orientada en una dirección positiva hacia la parte inferior.

B es el diámetro del micropilote y ϕ el diámetro de la barra (barra o carcasa).

En la cabeza, las fuerzas son transmitidas por la estructura (Fig. IV.3). Pueden ser representadas por N_0 (fuerza normal), T_0 (fuerza de corte) y M_0 (momento flector). El efecto de la fuerza normal puede ser separado de los efectos de la fuerza cortante y momento flector.

En una parte del eje del pilote, las fuerzas son transferidas por el empuje lateral del suelo, que aumenta a medida que el suelo se vuelve más inestable: $g(z)$ y $y(z)$ son el desplazamiento libre del suelo y el micropilote, respectivamente (Fig. IV.4).

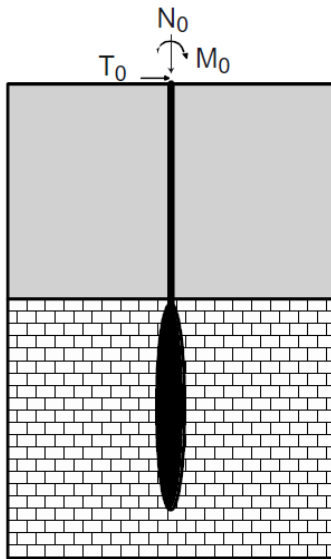


Figura IV.3 Micropilote sometido a fuerzas N_0 , M_0 y T_0 en su cabeza

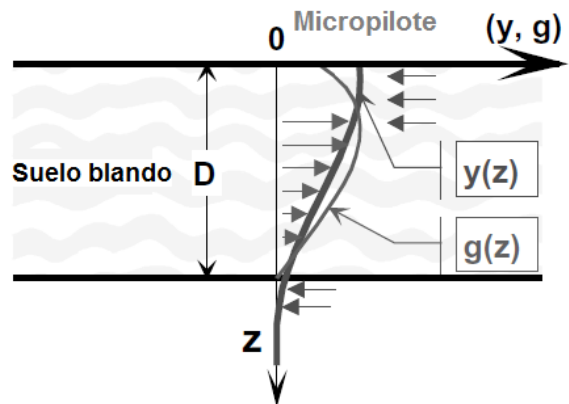


Figura IV.4 Micropilote bajo carga por fuerza lateral en parte de su eje

IV.3.2 Rangos de aplicación

Las diferentes situaciones donde los micropilotes son cargados de forma lateral son:

- fundaciones de marcos;
- fundaciones de pilares y estribos de puentes;
- micropilotes instalados a través de estratos profundos de suelo blando, cargados asimétricamente, lo que lleva a un empuje lateral sobre el eje;
- fundaciones de paredes de barreras de ruido;
- micropilotes bajo cargas sísmicas.

IV.3.3 Comportamiento de micropilotes bajo carga lateral

Cuando un micropilote es cargado en su cabeza por fuerzas laterales (momento flector M_0 y fuerza de corte T_0), la desviación hará movilizar la reacción del suelo p , con el fin de mantener el equilibrio en cada punto z con respecto al momento de flexión $M(z)$ y la fuerza de corte $T(z)$ (Fig. IV.5).

La reacción del suelo en el micropilote $P = p \cdot B$ [kN/m] es una función del desplazamiento y , perpendicular al micropilote. La curva de reacción del suelo $P(y)$ generalmente toma la forma de una curva hiperbólica (Figura IV.6).

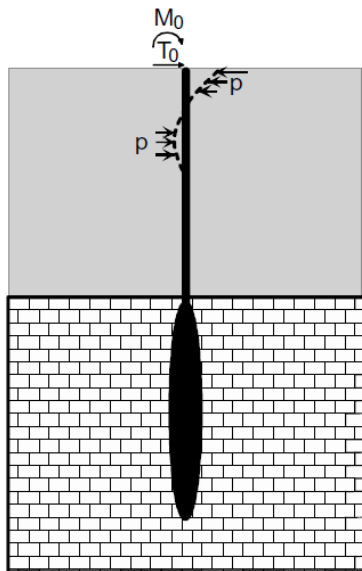


Figura IV.5 Movilización de la reacción lateral del suelo por un micropilote

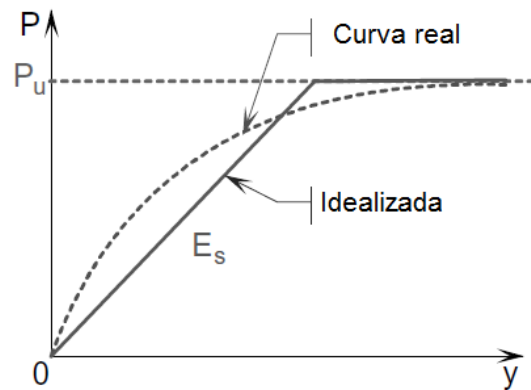


Figura IV.6 Curva de reacción de la interacción suelo-micropilote

Si la curva de reacción del suelo está linealmente aproximada por una línea secante y un valor límite para un desplazamiento dado, el módulo de reacción E_s puede ser definido por la pendiente de la curva (Fig. IV.6).

$$E_s = \frac{P}{y} \quad [\text{kPa}] \quad [\text{IV.6}]$$

El coeficiente de reacción k es definido como balasto:

$$k = \frac{p}{y} \quad [\text{kN/m}^3 \text{ o kPa/m}] \quad [\text{IV.7}]$$

esto da:

$$E_s = k \cdot B \quad [\text{IV.8}]$$

El comportamiento del micropilote depende de su propia rigidez a la flexión ($E_p \cdot I_p$) y la rigidez del suelo E_s , y por lo tanto en la relativa rigidez suelo-micropilote. Esto es clásicamente expresado por la longitud de transferencia l_0 .

Los micropilotes que tienen una alta relación de esbeltez (típicamente mayor a 100) evidencian el comportamiento flexible de un pilote largo, en la terminología de los cálculos de pilotes bajo fuerzas laterales. Su propia deformación debe ser considerada, pero las condiciones de punta no afectan las fuerzas y el desplazamiento sobre la parte superior del micropilote.

IV.4 Ensayo de carga en sitio experimental en Saint Rémy

IV.4.1 Introducción

El ensayo de carga a escala completa llevado a cabo en el sitio CEBTP en Saint-Rémy-les-Chevreuse constituye uno de los principales elementos del Proyecto Nacional Francés, FOREVER. Los objetivos del diseño para los experimentos fueron:

- 1- Tener un macizo de arena homogénea, suelta y de características mecánicas conocidas (medidas en el sitio o dentro de un laboratorio),
- 2- un plan de instrumentación fiable para monitoreo de sitio,
- 3- excavación de la locación del ensayo para observar las condiciones del micropilote y el suelo desplazado en la falla.

Los reportes de Plumelle y Pello (1995, FO/94/01 y FO/94/05) describen la construcción del macizo de arena y la instalación de los micropilotes que serán ensayados en la primera fase (aislados y en grupos).

El sitio experimental es un macizo de 10 m x 10 m de arena Fontainebleau comprimida o suelta, relleno homogéneo de 6 m de altura (Figura IV.7). Después de compactar 2 m de altura de base, capas de arena suelta de 30 a 40 cm han sido rellenadas con una pala mecánica.

Características del macizo de arena:

- Peso unitario seco: $14.40 \leq \gamma_d \leq 14.82 \text{ kN/m}^3$
- Contenido de agua: $7.90 \leq w \leq 10.8\%$
- Densidad relativa: $0.53 \leq I_D \leq 0.62$

Las características promedio del suelo medido con penetrómetro dinámico y presiométrico son:

- Módulo presiométrico: $2.2 \leq E_m \leq 6.3 \text{ MPa}$
- Presión límite presiométrico: $0.25 \leq p_1 \leq 0.56 \text{ MPa}$
- Resistencia de punta: $0.9 < q_d < 3.0 \text{ MPa}$
- $D_{50} = 0.15 \text{ mm}$
- $D_{m\acute{a}x} = 0.60 \text{ mm}$
- $C_u = 1.8$

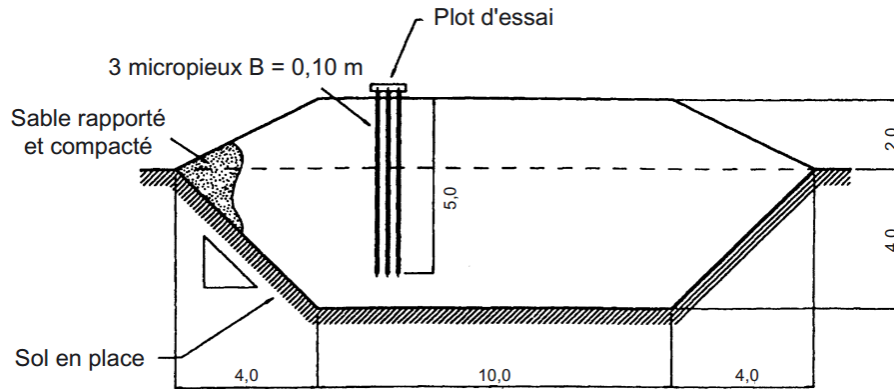


Figura IV.7 Corte del macizo experimental del CEBTP en Saint-Rémy-lès-Chevreuse (FOREVER, 2008)

En la siguiente sección sólo se presenta los resultados de los ensayos Tipo II, caso de interés en el estudio realizado en la presente memoria, el análisis completo de los resultados se encuentran en FOREVER (2008) o en los reportes de Plumelle et al.

IV.4.2 Micropilote aislado

Los micropilotes instalados son del Tipo II (micropilotes perforados con lechada por gravedad) y Tipo R-SOL (micropilotes perforados con desplazamiento de suelo, Tipo IV). Ellos tienen la misma dimensión:

- Longitud de anclaje: $L = 5 \text{ m}$
- Diámetro teórico: $B = 100 \text{ mm}$
- Tubo de acero: $\varphi = 40.3/50.3 \text{ mm}$

con:

- $E_{steel} = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$
- $E_{grout} = 1 \cdot 10^4 \text{ MPa}$

La instalación de los micropilotes perforados con lechada de gravedad implicaba un secado significativo de la lechada en la arena de Fontainebleau. Inyección de lechada de cemento adicional era necesaria, ya sea desde la parte superior de la perforación (Tipo II_h), o desde la base usando la técnica de tubería de 1 a 3 minutos después de la primera pasada de inyección (Tipo II_b). Para un micropilote, la lechada adicional representa 30% del volumen teórico de la perforación.

Todos estos micropilotes fueron excavados al final de la fase experimental y su diámetro medido fue aproximado 107 mm para el Tipo II y 100 mm para el R-SOL.



Figura IV.8 Micropilotes excavados (FOREVER, 2008)

IV.4.2.1 Carga vertical

El estudio realizado por Plumelle y Reynaud (1996) incluye 9 ensayos de carga vertical en micropilotes aislados Tipo II y R-SOL.

Los ensayos de carga axial en compresión fueron realizados de acuerdo a la norma NF P 94-150 con estados de carga de 60 min, con un sistema de reacción de anclaje que incorpora tiebacks (alambre o varilla horizontal) pretensados.

Las curvas de carga del ensayo en los micropilotes Tipo II son presentadas en la Figura VII.3. Una cierta dispersión se puede observar, en particular para cargas excediendo el punto de inflexión en las curvas de carga, lo cual representa aproximadamente la carga crítica de fluencia.

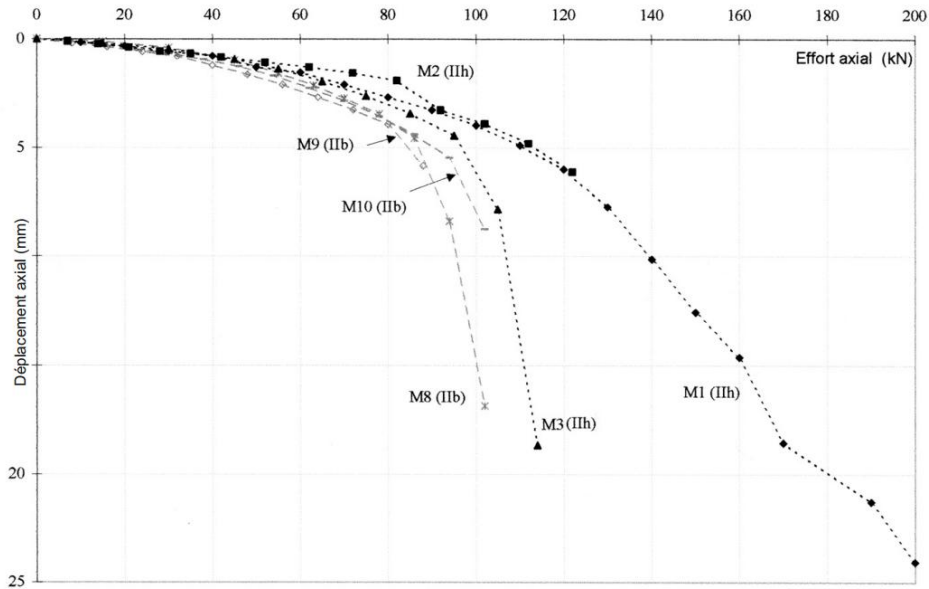


Figura IV.9 Ensayo de carga axial en compresión: curva fuerza/desplazamiento para los micropilotes Tipo II (FOREVER, 2008)

Resultados de todos los ensayos realizados son resumidos en la Tabla VII.1.

- Q_c : carga de fluencia crítica;
- S_{qc} : desplazamiento bajo la carga crítica;
- S_{me} : desplazamiento máximo correspondiente a la carga máxima;
- Q_{1e} : carga límite convencional determinada del ensayo de carga para el desplazamiento medido de la cabeza del micropilote o $0.1*B = 10$ mm;
- Q_c/Q_{1e} : relación entre la carga de fluencia crítica y la carga límite convencional;
- Q_{me} : carga máxima aplicada al micropilote;
- q_{se} : fricción límite promedio del fuste del micropilote.

Tabla IV.1 Resumen de ensayos de carga vertical en micropilotes aislados en el macizo de CEBTP (FOREVER, 2008)

Micropilote	Tipo	Q_c [kN]	S_{qc} [kN]	α_{qc} [%]	S_{me} [mm]	S_{res} [mm]	Q_{1e} [kN]	Q_c/Q_{1e}	Q_{me} [kN]	S_{real} [m ²]	q_{se} [kPA]
M1*	II _h	98	3,8	9	24	20,6	140	0,7	200	1,88	
M2*	II _h	72	1,6	3	6,1	4,2	> 122	-	122	1,9	
M3	II _h	98	5,9	30	19,2	173	106	0,9	114	1,82	52
M8	II _b	84	4,5	40	16,9	15	95	0,9	102	1,75	49
M9	II _b	80	4	20	6	4	> 88	-	> 88	1,76	> 45
M10	II _b	93	5,5	35	9,5	7,1	≈ 102	0,9	102	1,69	55
Promedio	II _b	86	4,7	32	10,8	14	> 95	0,9	> 97		50

Para micropilotes tipo II, ninguna diferencia obvia se puede observar por la carga límite entre Tipo II_h y Tipo II_b. Que ilustra la pequeña influencia del método utilizado aquí de inyección de lechada de cemento adicional para compensar la acción de secado. La dispersión observada entre el micropilote Tipo II se puede atribuir a la heterogeneidad de la geometría micropilote (diámetros variables), normalmente inevitable durante la instalación. Todos los micropilotes parecen hundirse en la falla para carga superior a la carga de fluencia crítica Q_c ($Q_c/Q_{1e} \approx 0.9$).

IV.4.2.2 Carga lateral

El sitio seleccionado para el Proyecto Nacional Francés FOREVER para la prueba en terreno realizada en micropilotes, cargados por fuerzas horizontales, T_0 , en la cabeza, era una estructura de tierra de CEBTP en Saint-Rémy-lès-Chevreuse (Plumelle & Reynaud, 1996).

El ensayo de carga horizontal fue realizado de acuerdo a la norma NF P 94-151 y se realizaron en ocho micropilotes como sigue:

- Precarga horizontal de $0.1 \cdot Q_{\text{máx}}$
- Estados de carga horizontal cada 30 min
- Descarga con una etapa intermedia

Tabla IV.2 Resultados de ensayo (FOREVER, 2008)

Nº	T_c [kN]	Y_{Tc} [mm]	θ_{Tc} (10^{-3} rad)	T_{1e} [kN] a 10 mm	T_{me} [kN]	Y_{me} [mm]
1	5	7	16	6	12	48
2	3,5	4	11	5,9	11	42
3	3	2	7	6,2	9	32
4	3	4	12	5,8	10	46
5	3,8	5	11	5,2	11	67
6	3,8	4,5	12	5,5	12	72
7	4,5	6,6	15	5,2	12	59
8	5	5,8	16	6,5	14	65
Promedio	4	4,9	13	5,8	11	54
DS	0,7	1,6	3	0,5	1,5	14

con:

- T_c : carga de fluencia crítica horizontal;
- Y_{Tc} : desplazamiento del micropilote a nivel del suelo correspondiente a T_c ;
- θ_{Tc} : rotación de la cabeza del micropilote correspondiente T_c ;
- T_{1e} : carga horizontal convencional límite determinada por el ensayo de carga horizontal para un desplazamiento de $0.1B = 10$ mm;
- T_{me} : carga máxima horizontal aplicada al micropilote;
- Y_{me} : máximo desplazamiento medido en el nivel del suelo, correspondiente a T_{me} .

Se presenta en la Figura IV.10, las correlaciones para lo predicho y medido desplazamientos y rotaciones en los micropilotes Tipo II.

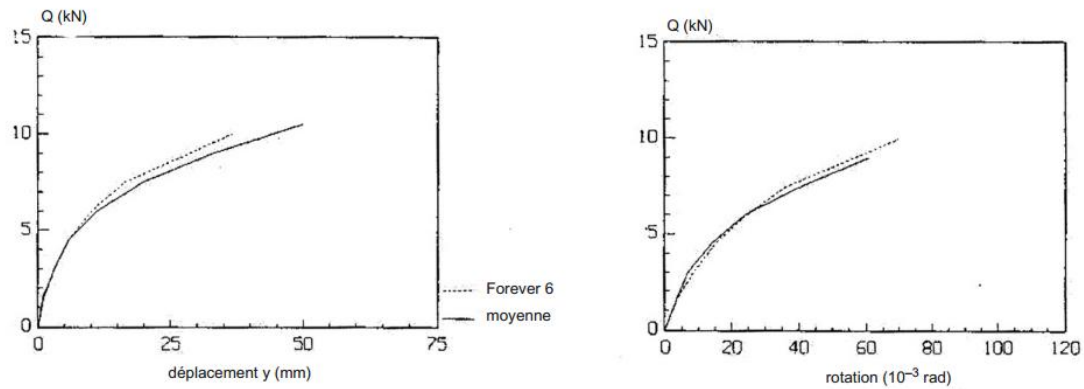


Figura IV.10 Curvas de carga-desplazamiento experimental y teóricas para los micropilotes Tipo II (FOREVER, 2008)

IV.4.3 Grupo de micropilotes

Dos grupos de 4 micropilotes, Tipo II_h y R-SOL respectivamente fueron ensayados bajo carga vertical y horizontal en el sitio CEBTP de Saint Rémy-lès-Chevreuse (Plumelle et al., 1995; Pello et al., 1995 y Plumelle y Raynaud, 1996).

Este ensayo fue realizado sobre un grupo de 4 micropilotes verticales. Los 2 grupos de micropilotes son (Figura IV.11):

- 1 grupo de 4 micropilotes Tipo II_h, con 2 diámetros de espaciamiento entre sus centros: M4, M5, M6, M7
- 1 grupo de 4 micropilotes R-SOL (Tipo IV), con espaciamiento de 2 diámetros entre sus centros: M14, M15, M16, M17

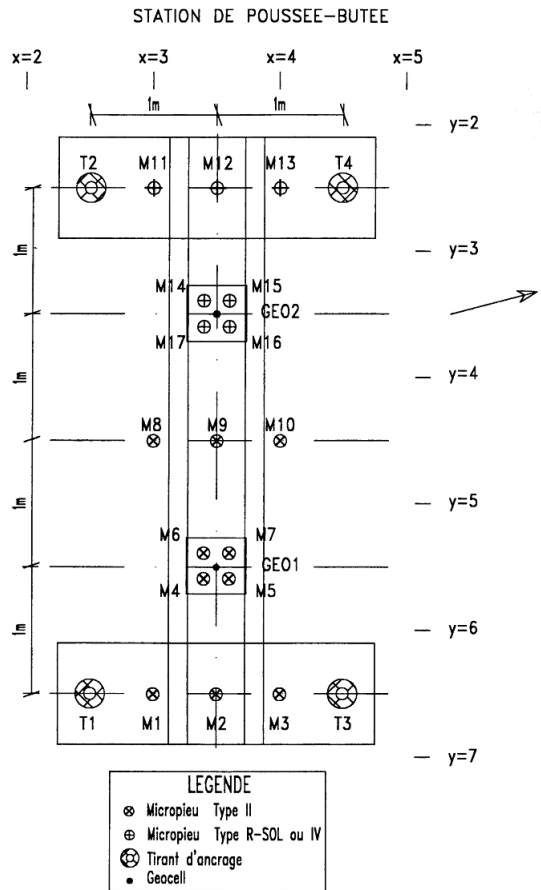


Figura IV.11 Implementación de los dos grupos de micropilotes y 9 micropilotes aislados en el sitio de Saint Rémy-lès-Chevreuse (FOREVER, 2008)

IV.4.3.1 Comportamiento bajo carga vertical

La Figura IV.12, muestra la curva de carga-desplazamiento aplicada del ensayo de carga vertical en el grupo de 4 micropilotes comparando la curva desarrollada por el micropilote aislado del mismo tipo (II_h).

El coeficiente de eficiencia de la carga vertical es definido a continuación:

$$C_e = \frac{\text{carga límite del grupo}}{N \cdot \text{carga límite del micropilote aislado}} \quad [IV.9]$$

donde N es el número de micropilotes en el grupo.

Para la carga límite del micropilote aislado, la media de los resultados del ensayo en el mismo tipo de micropilote fue considerado.

La Tabla IV.3 presenta los coeficientes de eficiencia solo para el grupo de micropilotes Tipo II, para 3 valores de carga límite: La carga de fluencia Q_c , la carga límite Q_{le} , correspondiente al desplazamiento de $0.1 \cdot B$, y la carga máxima alcanzada durante el ensayo Q_{me} .

Tabla IV.3 Coeficiente de eficiencia del grupo (Tipo II_h) para diferentes valores de carga axial (FOREVER, 2008)

	Tipo	Carga (kN)		C_e
		Grupo	Aislado	
Q_c	II_h	420	87	1.2
Q_{le}	II_h	540	123	1.1
Q_{me}	II_h	576	144	1

Los resultados apuntan a que el grupo de micropilote tipo II_h tiene un coeficiente de eficiencia siempre igual o mayor que 1.

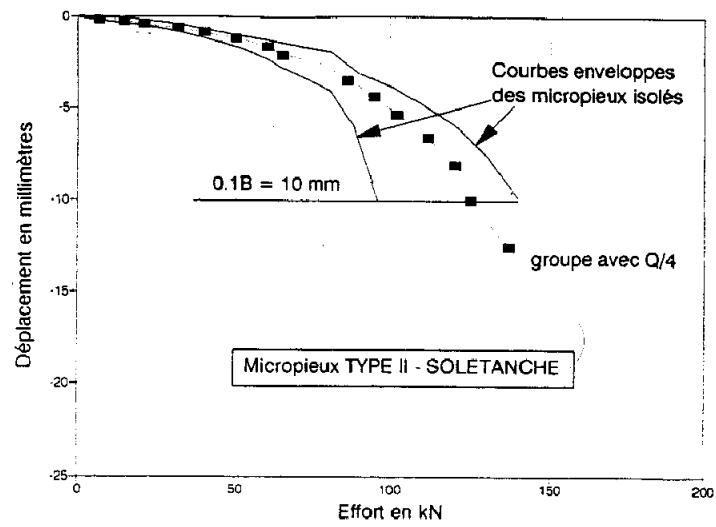


Figura IV.12 Comparación de curvas de carga vertical del grupo de 4 micropilotes (Tipo II_B) y de micropilotes del mismo tipo (FOREVER, 2008)

IV.4.3.2 Comportamiento bajo carga horizontal

El coeficiente de eficiencia C_e se define para el grupo bajo carga horizontal de manera similar a la utilizada para la carga vertical.

Tabla VII.4 reproduce los coeficientes de eficiencia para el grupo de micropilote bajo carga horizontal para valores de carga límite: La carga de fluencia crítica T_c , la carga T_{1e} correspondiente a un desplazamiento horizontal de $0.1 \cdot B$ y la carga máxima alcanzada durante la prueba de T_{me} .

Tabla IV.4 Coeficiente de eficiencia del grupo (Tipo II_h) para diferentes valores de carga horizontal (FOREVER, 2008)

	Tipo	Carga (kN)		C_e
		Grupo (4 mp)	Aislado	
T_c	II _h	10	3.8	0.65
$T_{1e}(0.1B)$	II _h	18	5.8	0.77
T_{me}	II _h	41	10.8	0.95

El efecto de grupo indicado por los resultados de la prueba de carga muestra una interacción negativa entre los micropilotes resultante del efecto de sombra de los micropilotes delanteras en el movimiento del suelo adyacente a los micropilotes traseros. Este fenómeno sombra es específica en cargas horizontales a menudo ha sido señalado por diversos autores.

Los resultados de las pruebas de carga horizontal fueron los esperados. La carga horizontal crítica de fluencia T_c es 10 kN para el grupo II_h, con desplazamientos 4.5 mm, respectivamente. Las cargas horizontales, sin embargo se vuelven más cerca de 1 para el desplazamiento horizontal convencional de $0.1 \cdot B$.

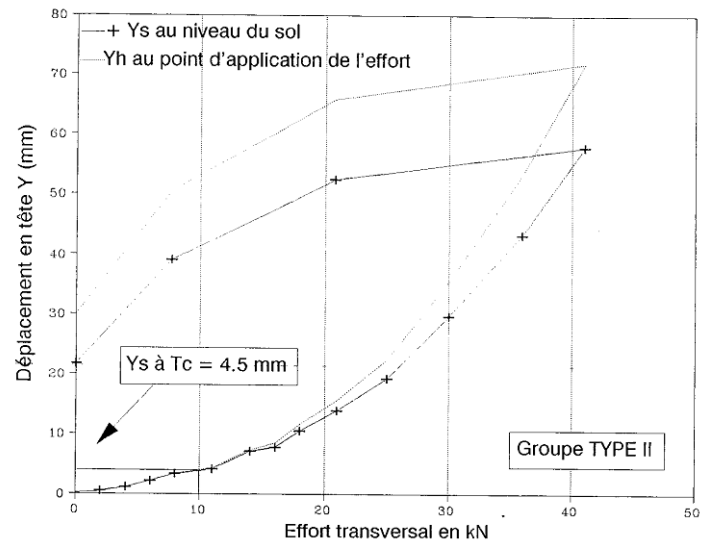


Figura IV.13 Curva de carga horizontal del grupo de 4 micropilotes del Tipo II_h (FOREVER, 2008)

Capítulo V

MODELOS CONSTITUTIVOS DE SUELOS

V.1 Introducción

Un modelo es una simplificación adecuada de la realidad. La habilidad en el modelado es detectar el nivel apropiado de simplificación para reconocer aquellas características que son importantes y las que no son importantes.

Modelamiento numérico, dentro de una comprensión de la física suele ser necesario idealizar la caracterización del material y la representación de las condiciones de contorno del problema para que se pueda obtener una solución. Las soluciones de forma exacta son en general sólo es obtenible para un conjunto bastante limitado de condiciones. Es necesario considerar si la adaptación del problema para eliminar estas restricciones elimina las características clave del problema que se está considerando. Cuando la salida de la situación ideal es claramente demasiado grande, existe la posibilidad de utilizar técnicas numéricas para obtener una solución, conservando la elegancia de una descripción teórica simple y ampliamente aceptada de la física del problema a escala local, pero utilizando el método de aproximación numérica para permitir condiciones de fronteras.

Un modelo constitutivo sigue siendo gobernado por ecuaciones que en última instancia, describe el vínculo entre los cambios en la deformación y los cambios en la tensión de cualquier elemento del suelo. Cada modelo constitutivo es ciertamente una simplificación del comportamiento del suelo, pero una simplificación inspirada en la observación experimental. La adecuada complejidad del modelado constitutivo debe ser la meta para que el análisis de los problemas de valor límite sea eficiente. Para historias realistas y condiciones de contorno se requiere nuevamente un análisis numérico para manejar la integración básica de las relaciones constitutivas.

V.2 Modelos elásticos

Los modelos constitutivos elásticos presentan una herramienta sencilla utilizada para el análisis de tensiones en suelos. Pueden adoptar varias formas: algunos asumen que el suelo es isotrópico, otros asumen que es anisotrópico; Algunos asumen que el suelo es lineal, otros que no es lineal, con parámetros dependientes de la tensión y/o nivel de deformación.

El comportamiento de un material elástico puede ser descrito por la generalización de la declaración original de Hooke, *ut tensio sic vis*: las tensiones están determinadas exclusivamente por las deformaciones; Que es una relación uno-a-uno entre la tensión y la deformación. Dicha relación puede ser lineal o no lineal, pero una característica esencial es que la aplicación y eliminación de tensión deja el material en estado inalterado y no se disipa ninguna energía neta, Figura V.1.

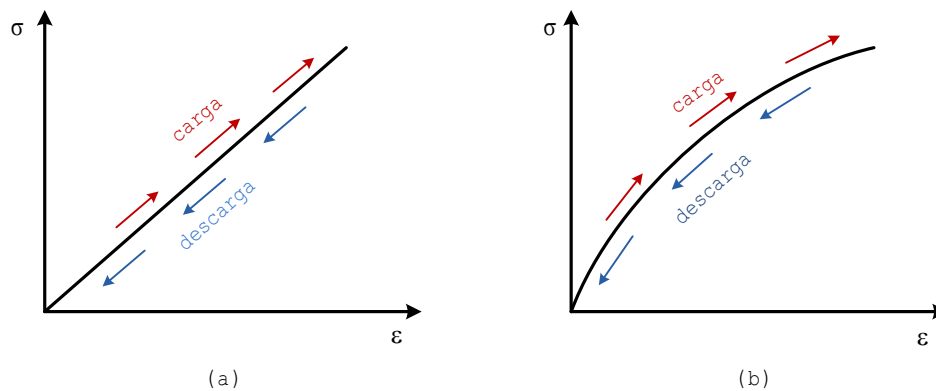


Figura V.1 Relación de tensión-deformación elástica, a) lineal y b) no-lineal

En el material elástico isotrópico sólo hay dos grados constitutivos de libertad que lo define, el módulo de Young, E y la relación de Poisson, ν . Estas expresiones describen la ley de elasticidad de Hooke para estados generales de tensión. La representación de este comportamiento es dada en la Ec. V.1.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & sym & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad [V.1]$$

Estos modelos elásticos lineales isotrópicos no simulan las facetas importantes del comportamiento del suelo. Para modelaciones en las cuales las tensiones son bajas, los modelos elásticos lineales predicen relativamente el comportamiento real del suelo. Sin embargo, para tensiones elevadas, los suelos presentan un comportamiento no-lineal con deformaciones plásticas o irreversibles. Por lo que su uso es limitado para el análisis de problemas geotécnicos.

V.3 Modelos elasto-plásticos

Los modelos elasto-plásticos consideran que los incrementos de deformación que acompañan cualquier cambio en la tensión, están conformados por una componente elástica (^e) (recuperable), calculada según la ley de Hooke, y por una componente plástica (^p) (irrecuperable).

$$\delta\varepsilon = \delta\varepsilon^e + \delta\varepsilon^p \quad [V.2]$$

Para el cálculo de las componentes plásticas se requiere definir los siguientes conceptos:

i) Coincidencia de eje

La dirección principal de la tensión acumulada y la deformación plástica incremental se asume que coincide. Esto difiere del comportamiento elástico donde la dirección principal de la tensión incremental y la deformación incremental coinciden.

ii) Función de fluencia

Se define una función de fluencia, F , que es una función escalar de la tensión (expresada en términos de los componentes de la tensión o invariantes de la tensión) y los parámetros del estado, $\{k\}$:

$$F(\{\sigma\}, \{k\}) = 0 \quad [V.3]$$

Esta función separa el comportamiento puramente elástico del elasto-plástico. En general, la superficie es función del estado de tensión $\{\sigma\}$ y su tamaño también cambia en función de los parámetros de estado $\{k\}$, que pueden estar relacionados con parámetros de endurecimiento/reblandecimiento.

El valor de la función F es usado para identificar el tipo de comportamiento del material. Comportamiento puramente elástico ocurre si $F(\{\sigma\}, \{K\}) < 0$, comportamiento plástico ocurre si $F(\{\sigma\}, \{K\}) = 0$. $F(\{\sigma\}, \{K\}) > 0$ significa una situación imposible.

iii) Función de potencial plástico

La especificación de la dirección de la deformación plástica en cada estado de tensión se realiza por medio de una *regla de flujo* que se puede expresar como sigue:

$$\Delta \varepsilon_i^p = \Lambda \frac{\partial P(\{\sigma\}, \{m\})}{\partial \sigma_i} \quad [\text{V.4}]$$

donde $d\varepsilon^p$ representa los seis componentes de la deformación plástica incremental, P es la función de *potencial plástico* y Λ es escalar un multiplicador. La función de potencial plástico es de la forma:

$$P(\{\sigma\}, \{m\}) = 0 \quad [\text{V.5}]$$

donde $\{m\}$ es esencialmente un vector de parámetros de estado, cuyos valores son inmutables, porque sólo las diferenciales de P con respecto a los componentes de tensión son necesarias en la regla de flujo.

Se puede realizar la simplificación al asumir la función de potencial plástico sea igual que la función de fluencia. En este caso la regla de flujo es asociativa. El vector incremental de deformación plástica es entonces normal a la superficie de fluencia. En el caso general en cual las funciones de fluencia y potencial plástico difieren, la regla de flujo se dice no asociativa.

En la regla de flujo asociativa la matriz constitutiva y su matriz de rigidez global son simétricas. La regla de flujo no asociativa, posee una matriz constitutiva y de rigidez global no-simétrica. Por lo que la inversión en las matrices no simétricas es mucho mayor en costos, en términos de almacenamiento y tiempo de cálculo.

La regla de flujo es de gran importancia en el modelamiento constitutivo debido a que gobierna los efectos de dilatación que a su vez tienen una influencia significativa en los cambios de volumen y resistencia.

iv) Regla de endurecimiento/reblandecimiento

Esta regla prescribe como varia los parámetros de estado $\{k\}$ con la deformación plástica. Esto permite que el escalar, Λ , sea cuantificado en Ec. [V.4]. Si el material es perfectamente plástico, no ocurre endurecimiento o reblandecimiento y el parámetro de estado $\{k\}$ es constante. Consecuentemente no se requiere regla. En algunos materiales Λ es indefinido. Esto se deduce del hecho de que una vez que el estado de esfuerzo se alcanza, y se mantiene en la fluencia, la deformación del material es indefinidamente. Sin embargo, para materiales que se endurecen o se ablandan durante la deformación plástica, se requieren reglas para especificar cómo cambia la función de fluencia.

V.3.1 Modelos elasto-plásticos perfectos

Para este material la superficie de fluencia se fija en el espacio de tensión y no cambia de posición cuando tiene lugar la carga. Si la tensión se mantiene por debajo de la superficie de fluencia el comportamiento es totalmente elástico. Si el estado de tensión alcanza la superficie de fluencia se produce una deformación plástica. No es posible que el estado de esfuerzo se extienda más allá de la superficie de fluencia.

En esta respuesta se supone que no hay plastificación progresiva del material y, por lo tanto, la superficie de fluencia permanece invariable durante la deformación e identificada en todo momento con la rotura. Los puntos interiores a ella, corresponden a estados elásticos puros, regidos por la ley lineal de Hooke, mientras que los puntos situados sobre dicha superficie se encuentran en régimen perfectamente plástico. En estos últimos, en principio, debería haber deformaciones indefinidas sin que existan nuevos incrementos de carga, no obstante, debido al efecto de contención ejercido por las zonas elásticas periféricas, se producen deformaciones limitadas. Suele suponerse también que durante los ciclos de descarga y recarga se cumple la relación de Hooke, manteniéndose el valor del módulo de elasticidad inicial.

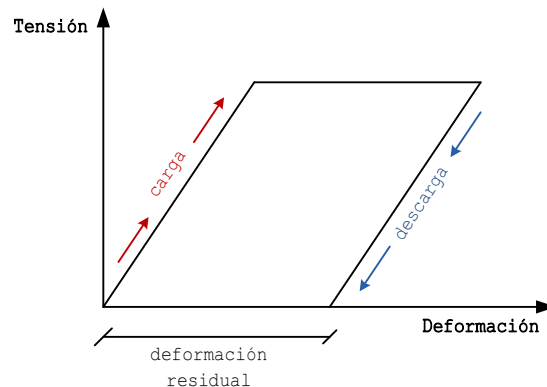


Figura V.2 Respuesta elasto-plástica perfecta

V.3.2 Mohr-Coulomb

Si se trazan los resultados de las pruebas de laboratorio en términos de esfuerzos efectivos, los círculos de Mohr de tensión en la falla se idealizan como se muestra en la Figura V.3. Es habitual asumir que la tangente a los círculos de falla a partir de varias pruebas, realizadas con diferentes esfuerzos efectivos iniciales, es recta. Esta línea se llama el criterio de falla de Coulomb y puede expresarse como:

$$\tau_f = c' + \sigma'_{nf} \cdot \tan \phi' \quad [V.6]$$

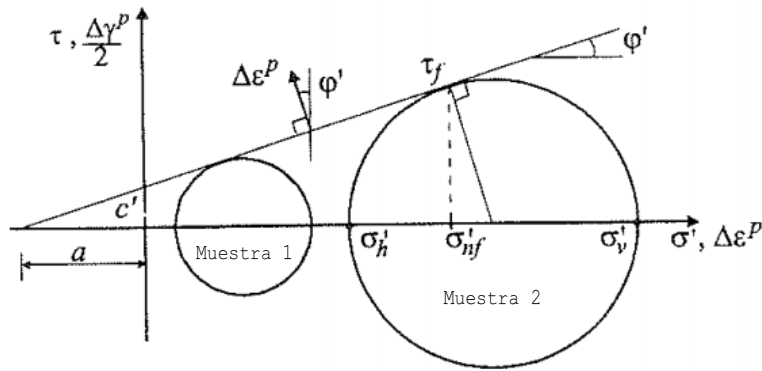


Figura V.3 Círculos de Mohr de tensión efectiva (Potts, 1999)

donde τ_f y σ'_{nf} son el corte y la tensión normal efectiva en el plano de falla, y la cohesión, c' , y el ángulo ϕ' de resistencia al corte, son parámetros del material. Utilizando el círculo de tensiones de Mohr, mostrado en la Figura V.2, y notando que $\sigma_1 = \sigma_v$ y $\sigma_3 = \sigma_h$, la Ecuación V.6 puede ser rescrita como:

$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = 2c' \cos \phi' + (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \phi' \quad [V.7]$$

Esto es llamado criterio de falla de Mhor-Coulomb y en el presente modelo se adopta como función de fluencia:

$$F(\{\sigma'\}, \{k\}) = \sigma'_1 - \sigma'_3 - 2c' \cos \phi' + (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \phi' \quad [V.8]$$

La ecuación escrita en términos de invariantes de tensión p' , J y θ .

$$F(\{\sigma'\}, \{k\}) = J - \left(\frac{c'}{\tan \phi'} + p' \right) g(\theta) = 0 \quad [V.9]$$

En el espacio de tensiones principales efectivas la función de fluencia se gráfica como un cono hexagonal irregular se muestra en la Figura V.3.

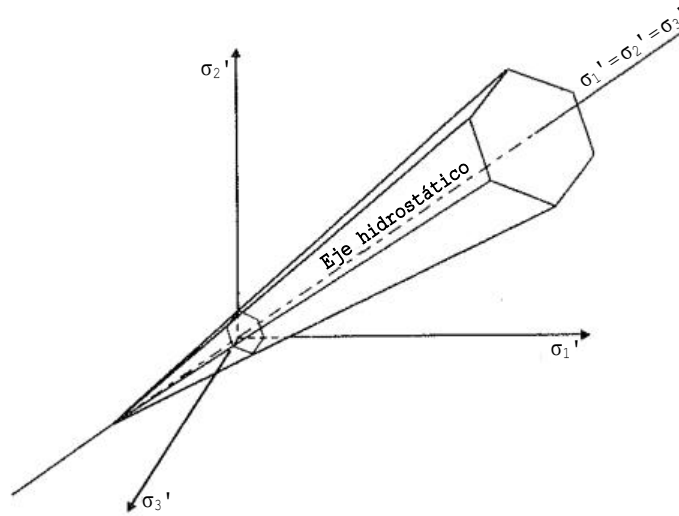


Figura V.4 Superficie de fluencia de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones principales

Este modelo posee la ventaja de que es simple y está validado para varios tipos de suelos, mientras su desventaja es que presenta irregularidades (esquinas) en la condición tridimensional producido al no considerar el efecto de la tensión principal media σ_2 .

V.3.3 Drucker-Prager

La función de fluencia de Mohr-Coulomb posee esquinas cuando es graficado en el espacio de tensiones principales efectivas, ver Figura V.3. Estas esquinas implican singularidades en la función de fluencia. En particular, la derivada parcial con respecto a los componentes de tensión, que son necesarias para definir la matriz constitutiva elasto-plástica $[D^{ep}]$, no son únicas en las esquinas. Aunque estas esquinas se pueden tratar en el análisis de elementos finitos, esto implica el uso de un elaborado código de computadora que inevitablemente resulta en el uso de más recursos del equipo.

Los pioneros anteriores del tema buscaron simplificaciones. La manera más común, pero no única, de superar el problema de la esquina es modificar la función de fluencia para que se trace como un cono cilíndrico.

Esto se puede lograr simplemente reemplazando en la Ecuación (V.9) $g(\theta)$ por una constante, M_{JP} , (es decir independiente de θ). La función de fluencia entonces se convierte en:

$$F(\{\sigma'\}, \{k\}) = J - \left(\frac{c'}{\tan \phi'} + p' \right) M_{JP} = 0 \quad [V.10]$$

donde M_{JP} es una constante del material. Esta forma de función de fluencia es llamada función de fluencia de Drucker-Prager o 'von Mises extendida'. En el plano desviador se grafica como un círculo.

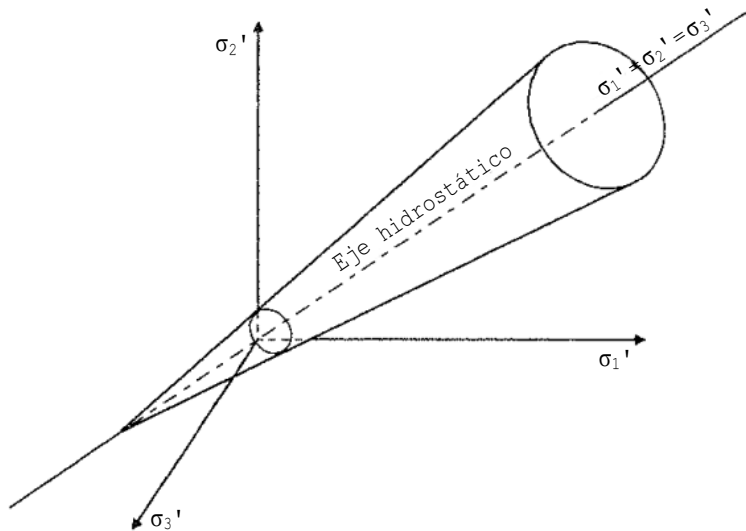


Figura V.5 Superficie de fluencia de Drucker-Prager en el espacio de tensiones principales

Para utilizar este modelo en la ingeniería geotécnica M_{JP} debe estar relacionada con el ángulo de resistencia al corte, ϕ' . El problema es mostrado esquemáticamente en la Figura V.6 donde el hexágono irregular de superficie de Mohr-Coulomb es comparado con la forma de superficie de Drucker-Prager en el plano desviador.

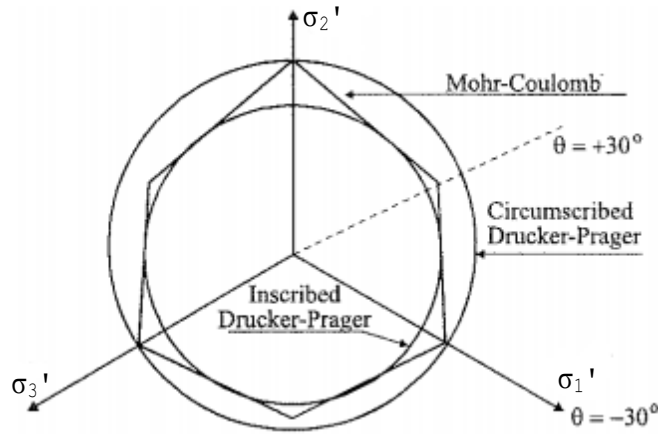


Figura V.6 Superficie de fluencia de Drucker-Prager y Mohr-Coulomb en el plano desviador (Potts, 1999)

Se muestran dos círculos alternativos de Drucker-Prager, uno circunscribe, mientras que el otro inscribe, el hexágono irregular de Mohr-Coulomb. Suponiendo que la superficie de Mohr-Coulomb es correcta, entonces el círculo de Drucker-Prager que proporciona el mejor ajuste al hexágono requerido.

Comparando la Ec. [V.9] y [V.10] da:

$$M_{JP} = g(\theta) = \frac{\text{sen } \phi'}{\cos \theta + \frac{\text{sen } \theta \text{ sen } \phi'}{\sqrt{3}}} \quad [V.11]$$

Esta ecuación permite la superficie de dos fluencias se adapten a un valor particular del ángulo de Lode, θ . La superficie circunscrita mostrada en la Figura V.5 toca el hexágono de Mohr-Coulomb en $\theta = -30^\circ$ (compresión triaxial). Sustituyendo de $\theta = -30^\circ$ en la Ec. [V.11] da:

$$M_{JP}^{\theta=-30^\circ} = \frac{2\sqrt{3} \text{ sen } \phi'}{3 - \text{sen } \phi'} \quad [V.12]$$

Del mismo modo, el círculo de Drucker-Prager que toca el hexágono de Mohr-Coulomb en $\theta = +30^\circ$ (extensión triaxial) se puede encontrar sustituyendo $\theta = +30^\circ$ en la ecuación la Ec. [V.11] para dar:

$$M_{JP}^{\theta=+30^\circ} = \frac{2\sqrt{3} \operatorname{sen} \varphi'}{3 + \operatorname{sen} \varphi'} \quad [\text{V.13}]$$

A continuación se presenta el modelo constitutivo de Drucker-Prager y sus características utilizado en ANSYS para la modelación de suelos.

Sus principales características son:

- el límite elástico o tensión de fluencia varia, dependiendo de la presión hidrostática,

$$\sigma_{y(\text{fluencia})} = f(\sigma_m)$$

$$\text{con } \sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 = \sigma_{hyd};$$

- comportamiento perfectamente plástico, para

$$\sigma_{egv} > \sigma_{y(\text{fluencia})}$$

$$\text{con } \sigma_{egv} = \left[1/2 \left((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right) \right]^{1/2}, \text{ tensión de von Mises};$$

- se puede producir alguna deformación volumétrica inelástica, según la definición del potencial de flujo.

Debido a estos puntos, se utiliza en la geomecánica, compactación de polvo representando el comportamiento de suelos secos, rocas, hormigón u otros materiales cuyo comportamiento elasto-plástico no solo se rige por el componente desviador de tensiones, sino que también por la tensión hidrostática y la deformación volumétrica inelástica.

V.4 Modelo de Drucker-Prager (DP)

Además de revisar la superficie de fluencia en el espacio de tensiones principales, como se ha mostrado anteriormente, también se puede observar la superficie de fluencia a lo largo del plano definido por la tensión efectiva (q o σ_{eqv}) y la presión hidrostática (σ_m). La superficie de fluencia de Drucker-Prager lineal se vería como se ilustra en la Figura V.2 a continuación.

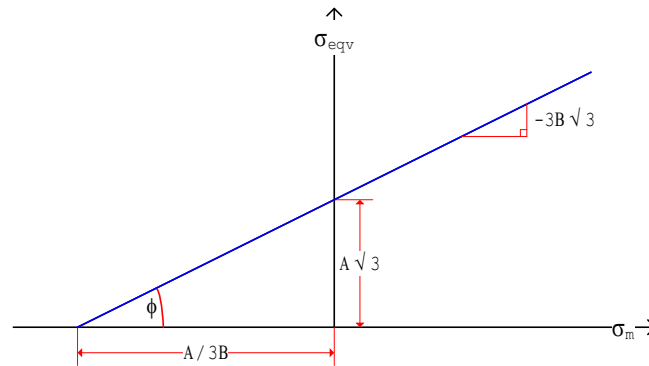


Figura V.7 Línea de falla de DP y relación de parámetros

Para la tensión media (o hidrostática), tiene una tensión de fluencia baja, llegando a 0 en cierto valor de σ_m . Este modelo reproduce el comportamiento observado en la práctica, debido a que los materiales granulares generalmente tienen baja resistencia a la tracción ($c \approx 0$). Para la tensión media compresiva, sin embargo se observa una tensión de fluencia directamente proporcional a la fuerza de compresión aplicada. La ecuación que rige este comportamiento es el siguiente:

$$F = 3 \cdot B \cdot \sigma_m + \frac{\sigma_{eqv}}{\sqrt{3}} - A = 0 \quad [V.14]$$

De donde se observa:

- la relación entre la tensión equivalente y la tensión media (hidrostática);
- la presencia de 2 parámetros del material, A (σ_y) y B (β). Estos parámetros deben ser proporcionados como datos de entrada para que el modelo pueda hacer la relación entre σ_{eqv} e σ_m .

Los parámetros que se deben ingresar al modelo son φ , c , Ψ . Para determinar φ y c , se deben realizar por lo menos dos tipos de ensayos: a) compresión y tensión uniaxial, o b) compresión uniaxial y compresión equi-biaxial, esto es necesario para materiales granulares, para los que no es posible hacer ensayos de tracción uniaxial.

Las ecuaciones ya deducidas y relacionadas con los parámetros obtenidas de las resistencias máximas de los ensayos se presentan a continuación (ANSYS, 2008).

$$A = \frac{6c \cdot \cos \phi}{\sqrt{3} (3 - \sin \phi)} \quad [V.15]$$

$$B = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3} (3 - \sin \phi)} \quad [V.16]$$

Físicamente, la cohesión c , está relacionada con la resistencia al esfuerzo cortante del material en ausencia de la presión hidrostática. Es la propiedad mecánica responsable de la resistencia de los suelos cohesivos, tal como la arcilla. Se expresa en unidades de tensión. En ANSYS, suelos con cohesión muy baja (arenas), pueden sufrir problemas de convergencia.

El ángulo de fricción interna ϕ , representa el grado de variación en la resistencia al esfuerzo cortante del material en función de cambios en la presión hidrostática ejercida sobre el material. Es la propiedad mecánica responsable de la resistencia de suelos no cohesivos, tal como los suelos arenosos. Se expresa en unidades angulares (grados o radianes).

ANSYS también permite la inserción de una tercera variable, la dilatación Ψ , que caracteriza el aumento de la presión hidrostática en el régimen plástico (regla de flujo).

Se puede decir que el ángulo de dilatación cuantifica la deformación volumétrica del suelo, post-plastificación, debido a que tal deformación está asociada a la presión hidrostática.

Para,

- $\Psi = \phi$, hay una expansión volumétrica significativa;
- $\Psi < \phi$, la expansión volumétrica es menor;
- $\Psi = 0$, no hay expansión volumétrica.

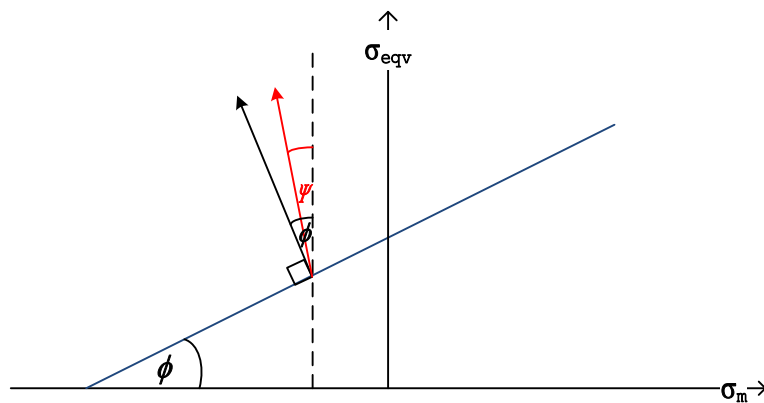


Figura V.8 Representación de ángulo de dilatación en criterio de falla de DP

Respecto al procedimiento para obtener el ángulo de dilatación Ψ , existe la alternativa de considerarlo igual a cero, lo que resulta conservador. De lo contrario, se debe obtener de resultados de ensayos de compresión triaxial.

V.4.1 Modelo extendido de Drucker–Prager (EDP)

El modelo Extendido de Drucker-Prager (EDP) es una extensión del modelo original de Drucker-Prager (DP) de criterio de fluencia lineal, en el cual se incorporan 2 elementos al modelo.

- i. La relación no lineal entre la tensión equivalente σ_{eqv} y tensión media σ_m .
- ii. El acoplamiento del modelo de endurecimiento.

Tanto el criterio de fluencia como la regla de flujo pueden ser definidos a través de tres modelos de manera independiente, estos son lineal, hiperbólico y ley de potencia, esto resulta, ya sea en una regla de flujo asociada o no asociada. Además permite la opción de un modelo de endurecimiento isotrópico post plastificación, lineal o multilíneo. Lo que permite que la superficie de fluencia, pueda variar con la fluencia progresiva a través de la opción de endurecimiento por plasticidad isotrópica del material, ver Figura VII.5.

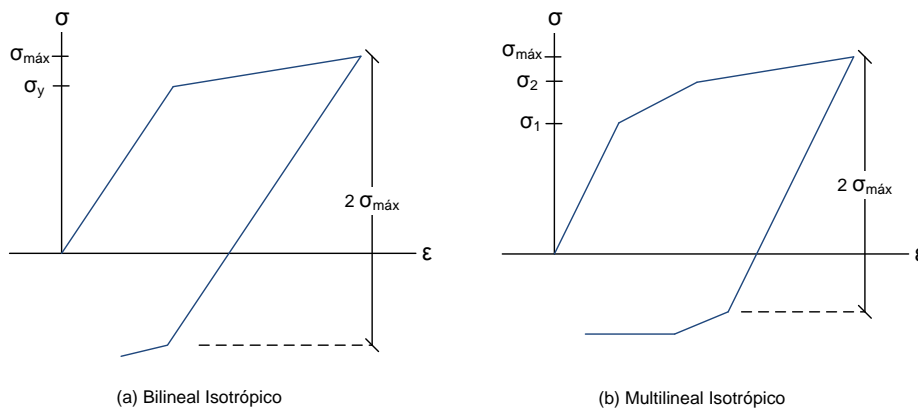


Figura V.9 Comportamiento de esfuerzo-deformación de cada opción de plasticidad
(a) Bilineal isotrópico y (b) Multilineal isotrópico

V.4.1.2 Relación de las variables con el modelo DP

El modelo EDP utiliza variables diferentes del modelo original DP (cohesión, ángulo de fricción interna y dilatancia), pero relacionados con el modelo original:

- α : parámetro que controla la influencia de la presión hidrostática en la fluencia del material;
- σ_y : tensión de fluencia del material, conforme a ensayos mecánicos;
- α_f : parámetro que controla la influencia de presión hidrostática en el comportamiento plástico del material (regla de flujo).

La relación de las variables con el modelo original de DP es el siguiente:

DP:

$$c = \frac{(3 - \text{sen } \phi)}{6 \cdot \cos \phi} \sigma_y \quad [\text{V.17}]$$

con $\sigma_y = A \cdot \sqrt{3}$

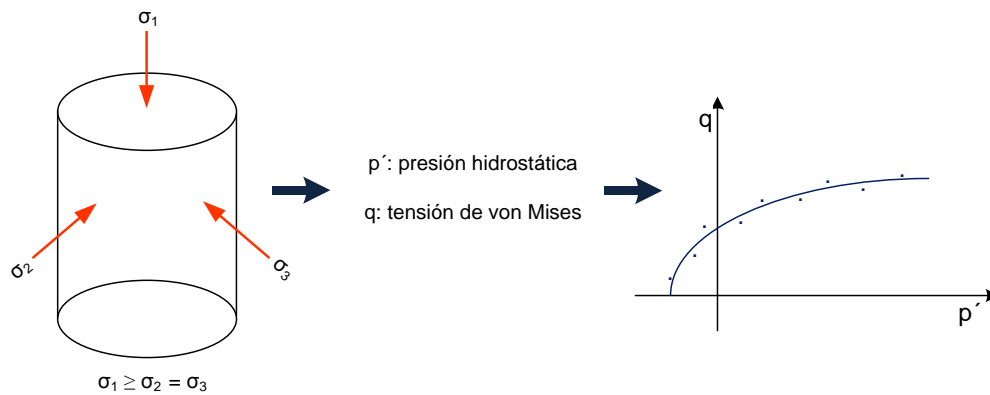
EDP:

$$\alpha = \frac{6 \cdot \text{sen } \phi}{(3 - \text{sen } \phi)} \quad [\text{V.18}]$$

$$\alpha_f = \frac{6 \cdot \text{sen } \psi}{(3 - \text{sen } \psi)} \quad [\text{V.19}]$$

V.4.1.3 Función de fluencia

Las variables que caracterizan al modelo EDP al igual que el DP se obtienen a través de los ensayos mecánicos de laboratorio, seguidos de un ajuste de curva. En el caso específico de EDP las variables pueden ser obtenidas directamente del modelo de DP, con las relaciones ya vistas.



$$p' = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) \quad [V.20]$$

$$q = \sqrt{\frac{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_1 - \sigma'_3)^2}{2}} \quad [V.21]$$

a) Lineal

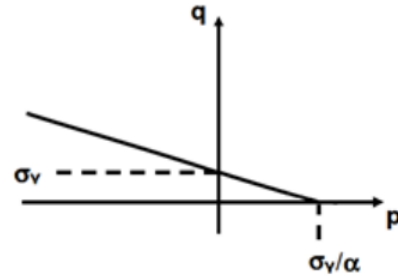
$$q + \alpha \cdot \sigma_m - \sigma_y (\varepsilon_p^i) = 0 \quad [V.22]$$

α : parámetro del material referido a la sensibilidad de la presión;

q : tensión desviadora de

Cauchy $q = \sqrt{\frac{3}{2} s : s}$;

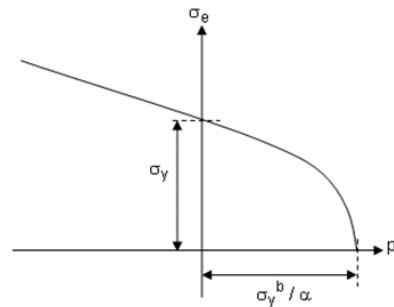
σ_y : tensión de fluencia del material.



b) Ley de potencia

$$q^b + \alpha \cdot \sigma_m - \sigma_y (\varepsilon_p^i) = 0 \quad [V.23]$$

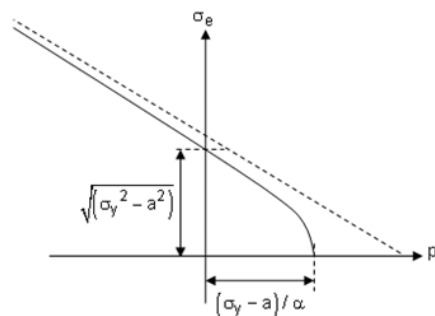
b : parámetro del material que caracteriza la forma de la superficie de fluencia.



c) Hiperbólica

$$\sqrt{a^2 + q^2} + \alpha \cdot \sigma_m - \sigma_y (\varepsilon_p^i) = 0 \quad [V.24]$$

a : parámetro del material que caracteriza la forma de la superficie de fluencia.



V.4.1.4 Regla de flujo

Describe la dirección (en el plano p-q) que el material sigue después del estado de fluencia. Es normal utilizar modelos similares al que se utiliza en la función de fluencia.

a) Lineal

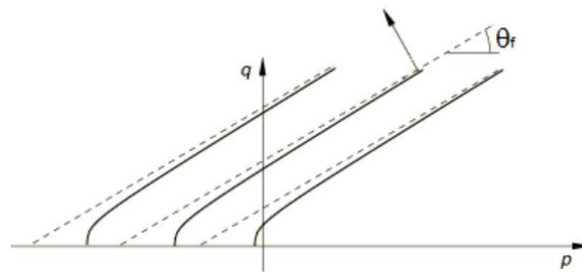
$$Q = q + \alpha_f \cdot \sigma_m - \sigma_y (\varepsilon_p^l) \quad [V.25]$$

b) Ley de potencia

$$Q = q^b + \alpha_f \cdot \sigma_m - \sigma_y (\varepsilon_p^l) \quad [V.26]$$

c) Hiperbólica

$$Q = \sqrt{a^2 + q^2} + \alpha_f \cdot \sigma_m - \sigma_y (\varepsilon_p^l) \quad [V.27]$$



Obs: se aplican las mismas reglas vistas en el modelo DP, es decir

Para:

- $\alpha_f = \alpha$, expansión volumétrica significativa;
- $\alpha_f < \alpha$, expansión volumétrica menor;
- $\alpha_f = 0$, no ocurre expansión volumétrica.

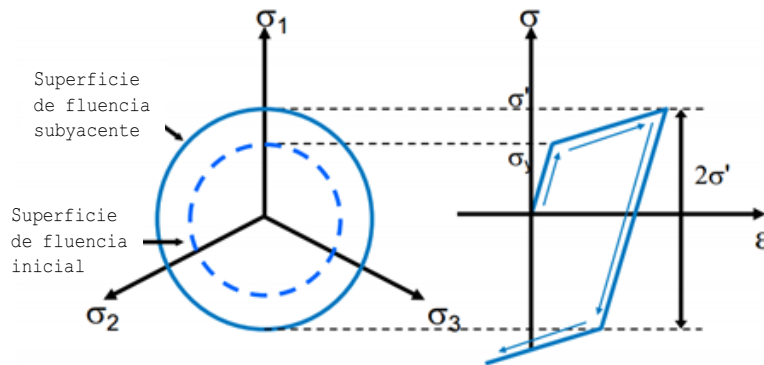
V.4.1.5 Modelo de endurecimiento

En el modelo EDP se pueden insertar curvas de "endurecimiento" del material, esto es el aumento de la resistencia mecánica tras la fluencia. Estas curvas fueron desarrolladas para materiales metálicos y deben ser adoptados cuidadosamente para el caso de suelo.

Pueden ser insertados los siguientes modelos:

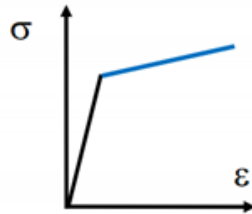
- Bilineal isotrópico
- Multilineal isotrópico

El modelo isotrópico se basa en la expansión de la superficie de fluencia con el aumento de la deformación plástica. La ocurrencia de endurecimiento por deformación en una dirección aumentara el límite elástico en toda la dirección. Por lo tanto en el caso si se invierte la carga, habrá mayor dificultad en alcanzar la fluencia.

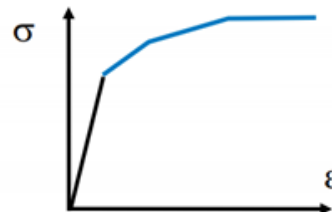


Se pueden optar entre 2 modelos isotrópicos,

- El bilineal, en el que se definen la tensión de fluencia y el módulo tangente.
- El modelo multilineal, en el que se proporciona la curva a partir de pares de puntos de tensión x deformación plástica.



Bilineal



Multilineal

Capítulo VI

MODELACIÓN NUMÉRICA

VI.1 Elementos finitos

VI.1.1 ANSYS

En la modelación de FEM realizada en la investigación se utilizó el software ANSYS versión 15.0, en el cual se trabajó en el área de Mecánica Estática. A continuación se detallan los aspectos principales considerados en ella.

VI.1.2 Parámetros

Micropilote: La modelación del comportamiento de los componentes del micropilote y su material, se utiliza un esquema lineal-elástico. A cada elemento del micropilote se le asignó

- módulo de Young, E
- módulo de Poisson, ν
- peso unitario, γ

Suelo: para modelar el comportamiento de la arena se utiliza la ley elasto-plástica de Drucker-Prager, con regla de flujo asociada.

Los parámetros que se ingresaron para el comportamiento de cada elemento, además de los 3 anteriores, son:

- coeficiente de empuje en reposo, K_0
- ángulo de roce interno, ϕ
- cohesión aparente, c
- ángulo de dilatancia, ψ

VI.1.3 Modelación de la carga

VI.1.3.1 Tensión inicial y peso propio

En el primer estado de carga, se aplica las tensiones iniciales junto con la fuerza de gravedad.

VI.1.3.2 Carga nodal

Se aplicaron cargas nodales, tanto en la dirección vertical como en la vertical.

VI.1.4 Interacción suelo-estructura

VI.1.4.1 Contacto micropilote

Los elementos que componen el micropilote, la lechada interior, el acero de refuerzo y la lechada exterior se le asigno el contacto tipo bonded.

- **Bonded:** La zona unida, no permite el deslizamiento ni la separación entre las caras o bordes. Es una región adherida. Este tipo de contacto permite una solución lineal ya que el contacto longitud/área no va a cambiar durante la aplicación de la carga. Si el contacto se determina en el modelo matemático, los vacíos (espacios) se cerrarán y cualquier penetración inicial serán ignoradas.

VI.1.4.2 Contacto punta micropilote

Para unir la base del micropilote con el suelo bajo el, se acoplo el desplazamiento de los nodos del micropilote con los nodos del suelo en todas las direcciones, es decir, se consideró un contacto rugoso.

- **Rough:** Esta configuración de modelo de contacto, fricción perfectamente rugosa donde no hay deslizamiento. Por defecto, no se realiza el cierre automático de las diferencias o espacios entre las superficies. Este caso corresponde a un coeficiente de fricción infinita entre los cuerpos en contacto.

VI.1.4.3 Contacto fuste micropilote

Según Poulos y Davis (1980), el efecto de interacción entre pilote y suelo puede ser significativo, incluso para fuerzas laterales de pequeña magnitud. Este efecto es más notorio para pilotes flexibles, en este caso los micropilotes ya que poseen una gran esbeltez.

Por tanto, con el fin de modelar el comportamiento de los micropilotes bajo carga lateral y axial, se utilizó elementos de interfaz suelo-micropilote que permitan simular la interacción. En los elementos de contacto en la interfaz del suelo-micropilote, se requiere que estos posean una cierta rigidez:

- a. **Rigidez de contacto normal:** Con la cual se determina si es que se producirá penetración (superposición) entre las superficies de contacto.
- b. **Rigidez de contacto tangencial:** Con la cual se determina la cantidad de deslizamiento en los contactos unidos.

Elevado valor de rigidez disminuye la cantidad de penetración/deslizamiento, pero puede producir un mal condicionamiento de la matriz de rigidez y por ende dificultades en la convergencia. Valores de rigidez más bajas pueden dar lugar a una cierta cantidad de penetración/deslizamiento y producir una solución inexacta. Idealmente se utiliza una rigidez que se ajuste a ambas condiciones.

- **Frictional:** En esta configuración, las dos geometrías de contacto pueden llevar a tensiones de cizallamiento hasta una cierta magnitud a través de su interfaz antes de que comiencen el deslizamiento relativo entre sí. Este estado se conoce como "adherido". El modelo define una tensión de cizallamiento equivalente a la que se desliza sobre la geometría comienza como una fracción de la presión de contacto. Una vez que se supera la tensión de corte, las dos geometrías se deslizan respecto a la otra. El coeficiente de fricción puede ser cualquier valor no negativo.

VI.1.5 Modelación geométrica y condición de borde

En el análisis de los diferentes modelos se utilizó elementos finitos (FEM). Los modelos en FE proporcionan una aproximación rigurosa y flexible para el modelamiento de problemas de interacción suelo-fundación. Se puede modelar casi cualquier configuración de geometría, materiales del suelo y el micropilote, aplicación de la carga, las condiciones de contorno. Además, la continuidad y la no linealidad del suelo pueden ser tenidas en consideración utilizando el método FEM.

Sin embargo, la exactitud de los resultados en el modelado FE depende tanto en la exactitud de los modelos constitutivos y el uso de apropiados valores de entrada en las propiedades del suelo que se utilizan en los modelos. Otro inconveniente es el gran tiempo de cálculo, especialmente para un modelo tridimensional (3-D). A pesar del desarrollo tecnológico, los métodos de elementos finitos 3D siguen teniendo un alto costo computacional. El tiempo de ejecución de un modelo depende de la cantidad de nodos, del tipo de análisis (estático, modal y transiente), de las leyes constitutivas del material, de los criterios de convergencia dispuestos entre otros.

VI.1.5.1 Elemento finito

Para el análisis, se utilizaron elementos hexaedros irregulares de 8 nodos. Cada nodo cuenta con 3 grados de libertad, que corresponden a los desplazamientos en los ejes principales, Figura VI.1.

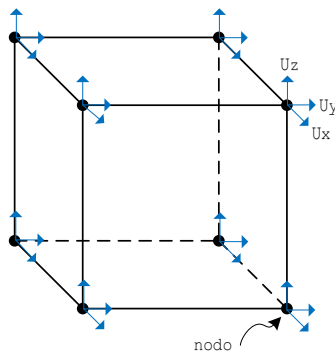


Figura VI.1 Elemento hexaedro de 8 nodos

VI.1.5.2 Condición de simetría

Se utilizó simetría transversal, debido a la simetría de los micropilotes, de sección transversal circular, frente a carga lateral y vertical, y así modelar con elementos finitos solo la mitad del modelo, reduciendo el costo computacional, Figura VI.2.

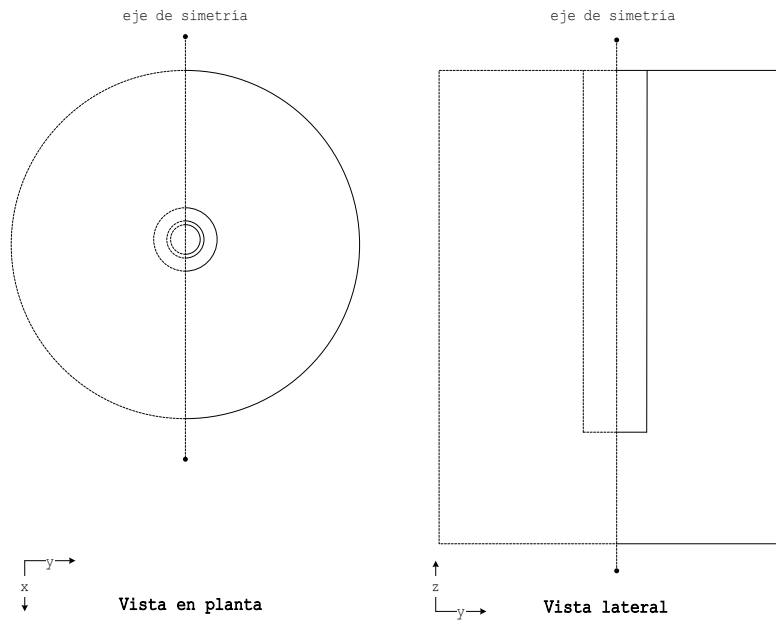


Figura VI.2 Simetría del modelado FE en el micropilote aislado

VI.1.5.3 Condición de borde

A los nodos ubicados en el plano horizontal inferior del modelo se restringieron sus movimientos en los 3 grados de libertad, en cambio, a los nodos situados en los planos verticales que limitaban el modelo, se les restringió solo el desplazamiento en dirección perpendicular a su plano, Figura VI.3. Se comprobó que no existan tensiones de tracción en las cercanías de los bordes del modelo.

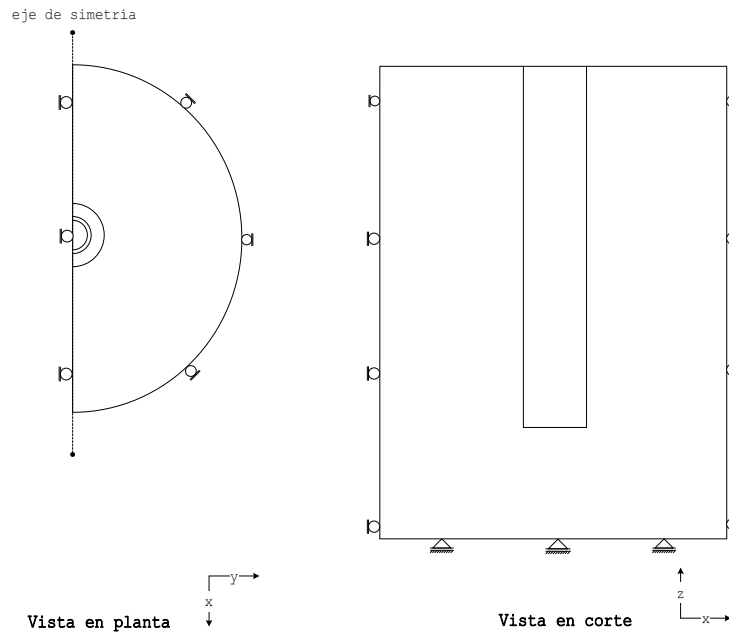


Figura VI.3 Representación de condición de borde en el modelado FE

VI.1.5.4 Solución y convergencia

El problema propuesto presenta 2 factores que lo hacen no lineal:

- Contacto entre el suelo y micropilote
- Modelo constitutivo del suelo

En un problema no lineal la carga total se divide en pequeños incrementos de carga o desplazamiento de Newton-Raphson para ajustar de forma gradual a la ley constitutiva de cada elemento del suelo Figura VI.4.

Mediante dicha formulación la matriz de rigidez del elemento se actualiza en cada iteración dentro de cada incremento de carga. Además, el programa permite el efecto de grandes deformaciones.

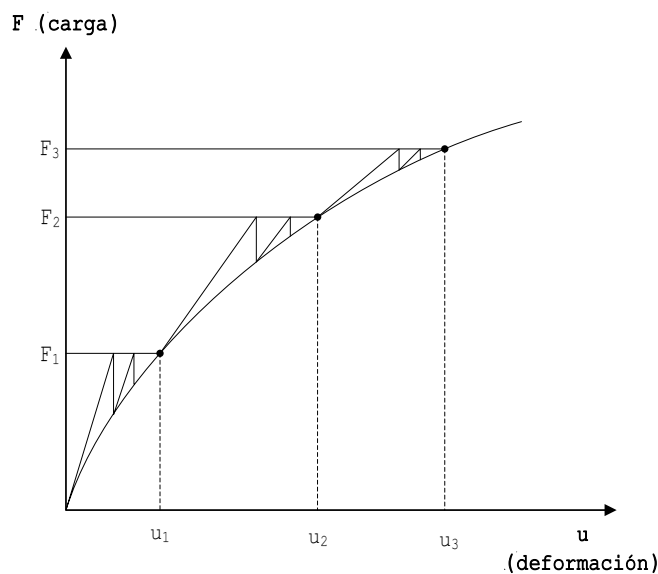


Figura VI.4 Formulación de Newton-Raphson para 3 incrementos de carga

VI.2 Validación del modelo

La validación del modelo numérico y constitutivo utilizado, se realizó a través de la comparación de los resultados obtenidos en la investigación de García (2008) y en un análisis analítico de una cimentación superficial, Helwany (2007).

- i. Análisis numérico de pilotes en arenas sometidos a cargas laterales;
- ii. Capacidad de carga de zapata corrida, utilizando el método de Terzaghi y Método de Elementos Finitos.

Se crearon para ambos casos, modelos de elementos finitos, a los cuales se les ingreso los mismos parámetros de diseño y propiedades de los materiales utilizados. Al realizar esta comparación, se valida la utilización del software ANSYS, MECHANICAL en el diseño de modelos que implica la interacción de suelo-estructura.

VI.2.1 Análisis numérico de pilote

En la investigación de García (2008), se realizó el modelamiento numérico de pilotes en arena, bajo carga lateral. Se realizo en el Software, ANSYS Mechanical y el modelo constitutivo utilizado para el modelado del suelo es el elasto-plástico de Drucker-Prager. Se compara el resultado obtenido del estudio de 1 pilote aislado, Figura VI.5. Se presenta en la tabla los parámetros y valores utilizados:

Tabla VI.1 Propiedades de los materiales

	Tipo	Dr	γ_d/γ_w	ν	ϕ	ψ	GS	E [MPa]	m
Arena	suelta	35%	1.4	0.3	39.1°	7°	2.7	18	0.56
	densa	75%	1.55	0.3	47.1°	17°	2.7	32	0.62

Pilote	B [m]	L [m]	E [MPa]	ν	γ [t/m ³]	d [mm]	-	-	-
	0.6	20	27865	0.2	2.5	60	-	-	-

Las condiciones de borde y simplificaciones utilizadas en el modelo son las siguientes, y se representan en la Figura VI.16:

- simetría transversal o plano central (YZ);
- contacto perfecto entre suelo-fundación (comparten los puntos nodales);
- la base del modelo es fija, en dirección vertical y horizontal;
- el plano vertical del modelo es fijo en la dirección horizontal, pero libre en la vertical.

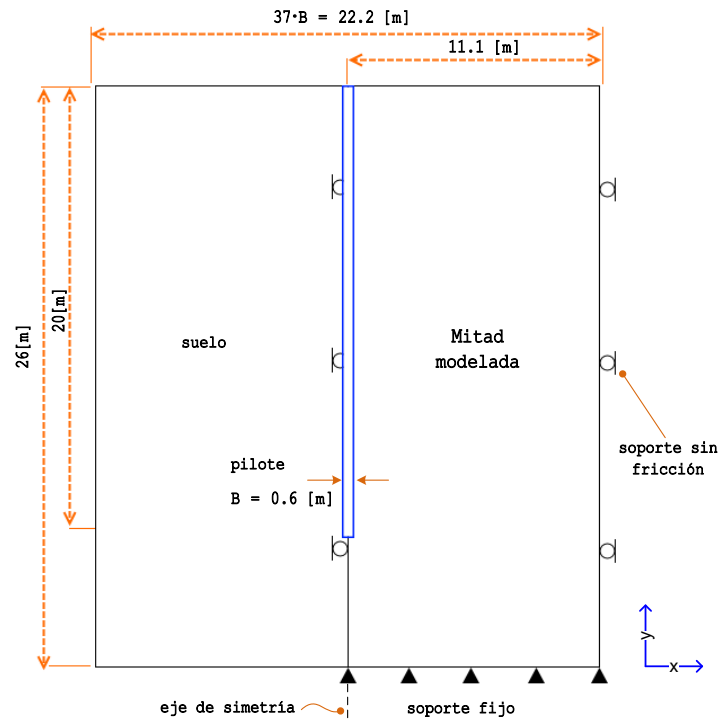


Figura VI.5 Idealización del problema en el plano y condiciones de borde

La carga utilizada en la cabeza de los pilotes en ambos casos fue un desplazamiento d , equivalente al 10% del ancho del pilote de sección cuadrada, se analizó el caso de pilote flexible de 0.6 m de ancho y arena densa (Tabla VI.1). A continuación se presenta la curva carga-desplazamiento.

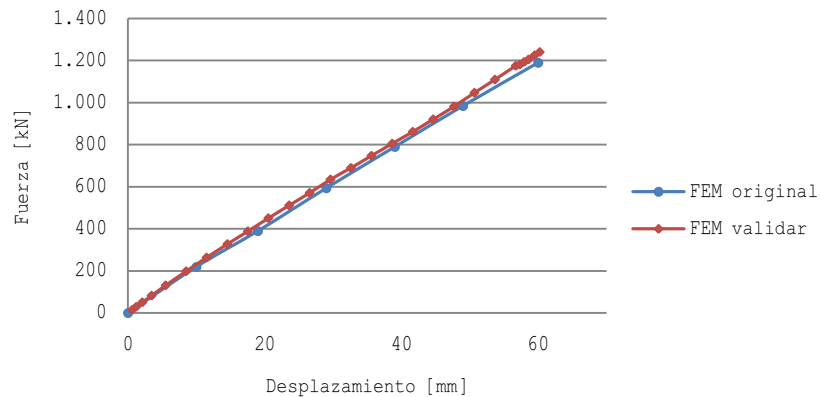


Figura VI.6 Comparación de resultados de los 2 modelos, García (2008) y el trabajo actual a validar

En el gráfico de la Figura VI.6 se compara el resultado de la curva carga - desplazamiento obtenida con el modelo FE y con la medida por García (2008). Se observa un buen ajuste, la respuesta presenta un comportamiento lineal-elástico.

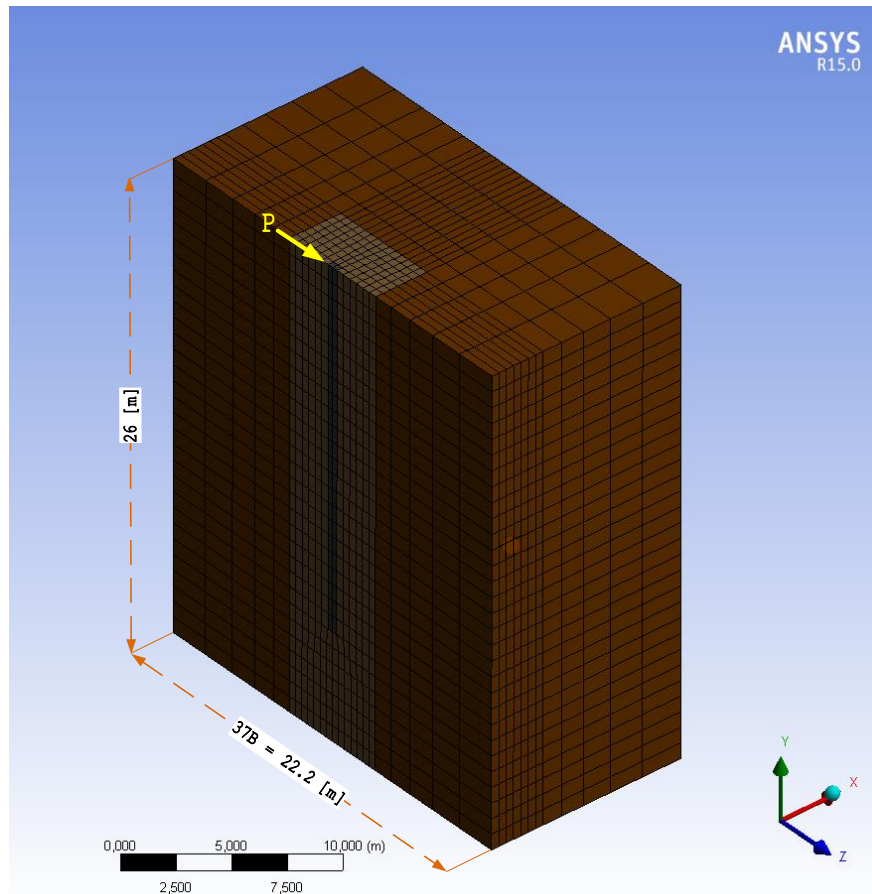


Figura VI.7 Detalle 3D del modelo FE realizado

El modelo FE utilizado se presenta en la Figura VI.7, donde se detalla la dimensión del modelo, el tipo de mallado utilizado y la posición junto al sentido de la carga aplicada sobre el pilote. La distribución de las isolíneas de deformación producidas en el sistema suelo-pilote tras la aplicación de la carga se presenta en la Figura VI.8, la zona de influencia producida en el modelo alcanza en el eje X, 4.5 [m] en dirección de la carga, en el eje Y 5.5 [m], perpendicular a la carga y el eje Z, 5.5 [m] de profundidad. Fuera de ese rango el valor de deformación del sistema tiende a 0 [m].

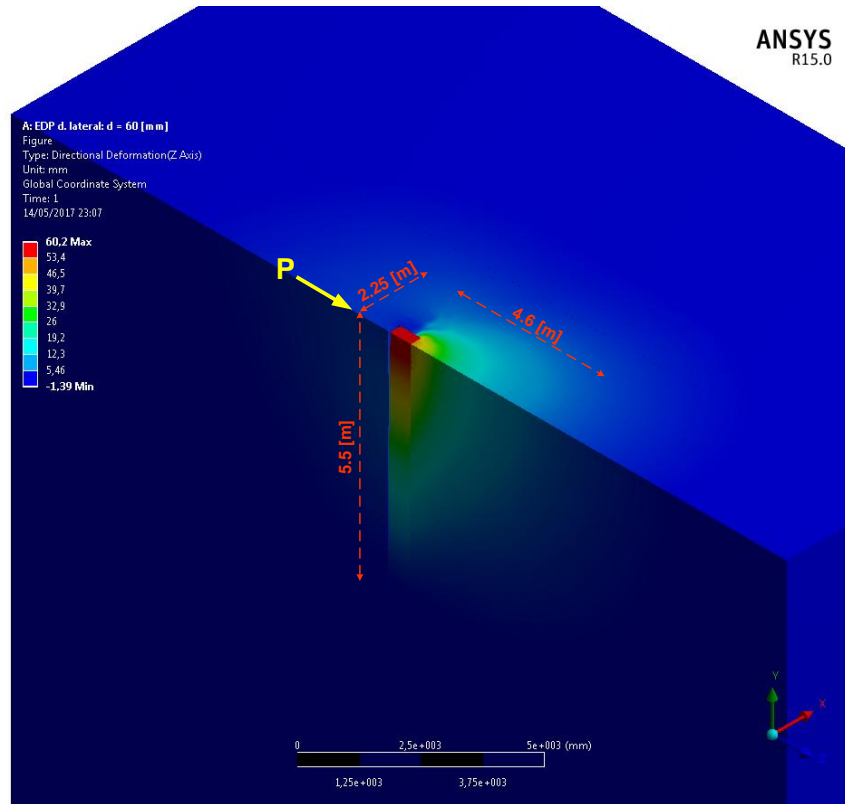


Figura VI.8 Isolneas de deformación direccional tras la aplicación de la carga

VI.2.2 Análisis numérico de cimentación superficial

A través de búsqueda bibliográfica (Helwany, 2007), se obtuvo un modelo de elementos finitos, que incluye información de ensayos de laboratorio con lo cual obtener las propiedades del suelo y del modelo constitutivo utilizado. En este caso la solución del FEM es provista por el software ABAQUS. Con lo que se realiza la comparación de los resultados obtenidos en ambos softwares.

Se presenta un ejemplo de equilibrio límite para la solución de un estrato de arena Ottawa cargada por una zapata corrida rígida, perfectamente rugosa. La solución obtenida utilizando FEM, en donde el comportamiento del suelo es simulado utilizando el modelo CAP (Drucker-Prager modificado con compactación).

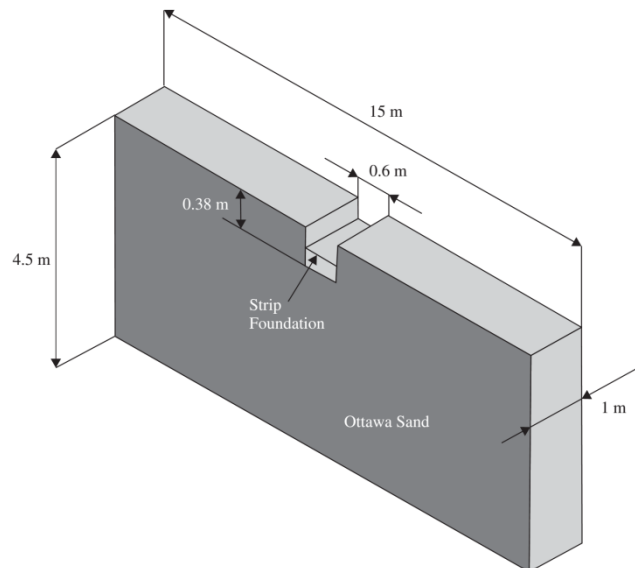


Figura VI.9 Fundación corrida situada en arena Ottawa, Helwany 2007

El esquema del modelo de deformación plana analizado se muestra en la Figura VI.10, se utiliza

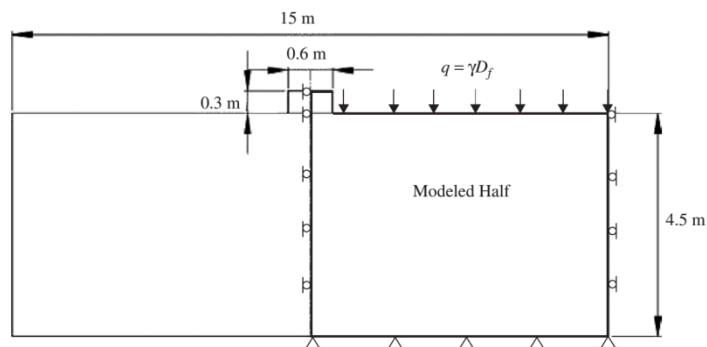


Figura VI.10 Idealización del problema de deformación plana en fundación corrida, Helwany 2007

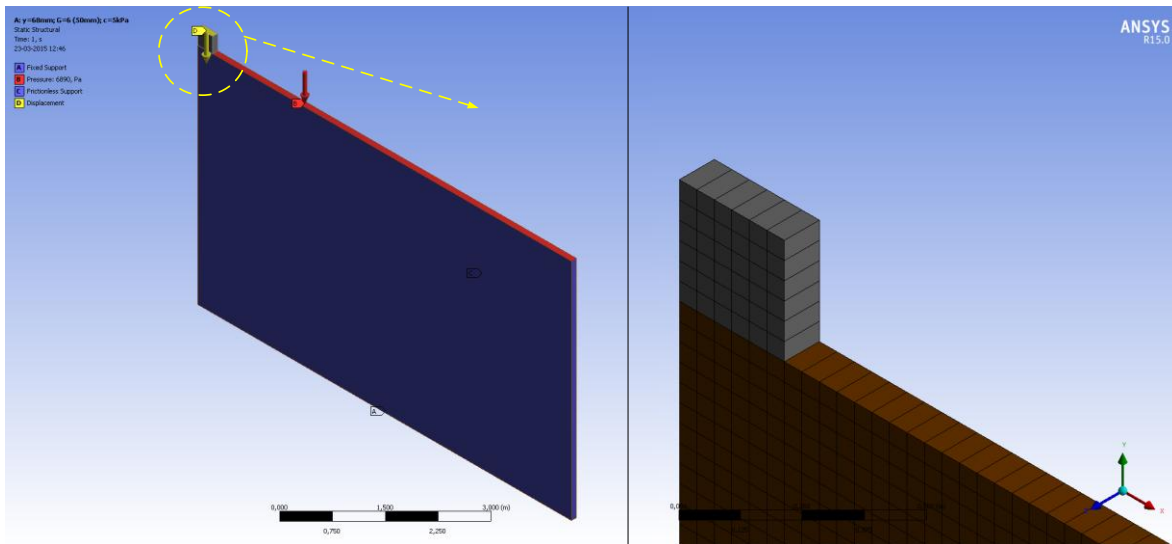


Figura VI.11 Detalle del modelo FE realizado en ANSYS

Es de interés obtener principalmente la presión límite de la fundación y en estimar el desplazamiento vertical bajo la fundación como una función de la carga. El análisis se realiza utilizando análisis estático. Bajo análisis estático las cargas en el problema se aplican estáticamente sin inducir ningún efecto dinámico en el modelo. Sin embargo, para los problemas con distorsiones graves esperadas, como el problema en cuestión, un análisis estático puede terminar cuando unos pocos elementos del suelo cerca del borde de la cimentación se distorsionan excesivamente. La condición de límite desplazamiento constante aplicada a la superficie superior de la cimentación hace que la base se asiente a una velocidad constante. Teóricamente, la presión de la fundación se puede aumentar gradualmente hasta el punto de fallo (denominado capacidad de carga) en el que se desarrolla una superficie de falla.

La curva presión- asentamiento para el análisis estático se muestra en la Figura VI.12. Ambos análisis concuerdan bien hasta que algún elemento del suelo en la vecindad de la esquina de la fundación se ha distorsionado severamente. El análisis estático se termina automáticamente en esa etapa. No obstante, ambos análisis predijeron aproximadamente la misma capacidad de soporte de 440 kPa. Como referencia, la capacidad de soporte de 586 kPa predicha por la ecuación de Terzaghi también se muestra en la Figura VI.11. Tenga en cuenta que la predicción de elementos finitos de la capacidad de carga es significativamente menor que la capacidad de carga de Terzaghi. Esta diferencia puede atribuirse a varias causas, la más importante de las cuales es que la ecuación de Terzaghi supone que el suelo es un material rígido-perfectamente plástico que falla abruptamente cuando se alcanza la capacidad de carga del suelo.

Por el contrario, el presente análisis de elementos finitos supone que el suelo es un material elasto-plástico con endurecimiento. Dicho material se deformará bajo cargas aplicadas, en oposición a un material rígido que no se deforma. Además, el suelo puede fluir de una manera progresiva debido a la naturaleza de la formulación de elementos finitos, los elementos pueden fluir gradualmente y progresivamente: Un elemento que fluye produce que fluya un elemento próximo a él, y así sucesivamente hasta que una superficie de corte similar se forme.

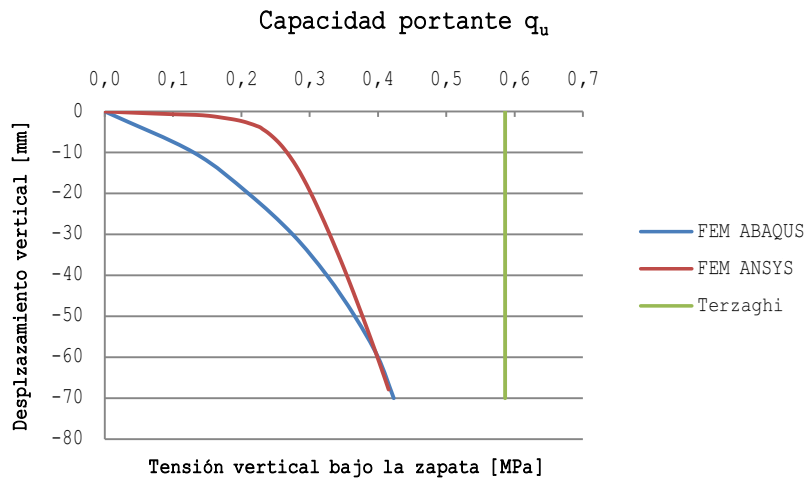


Figura VI.12 Curva carga-desplazamiento: comparación de resultados de ambos FEM con el del cálculo de Terzaghi

Se observa de la Figura VI.13 el bulbo de presión o zona de influencia en la arena resultante tras el asentamiento de 68 [mm] de la zapata corrida. Se observa las isóneas con los distintos rangos de presiones, alcanzando el máximo de 435 [kPa] en la esquina inferior de la zapata en la profundidad del asentamiento impuesto de 68 [mm], el rango mínimo de 50 [kPa] se alcanza hasta la profundidad de 3.9 [m]. Fuera de la zona del bulbo, la presión es de 2.5 [kPa]

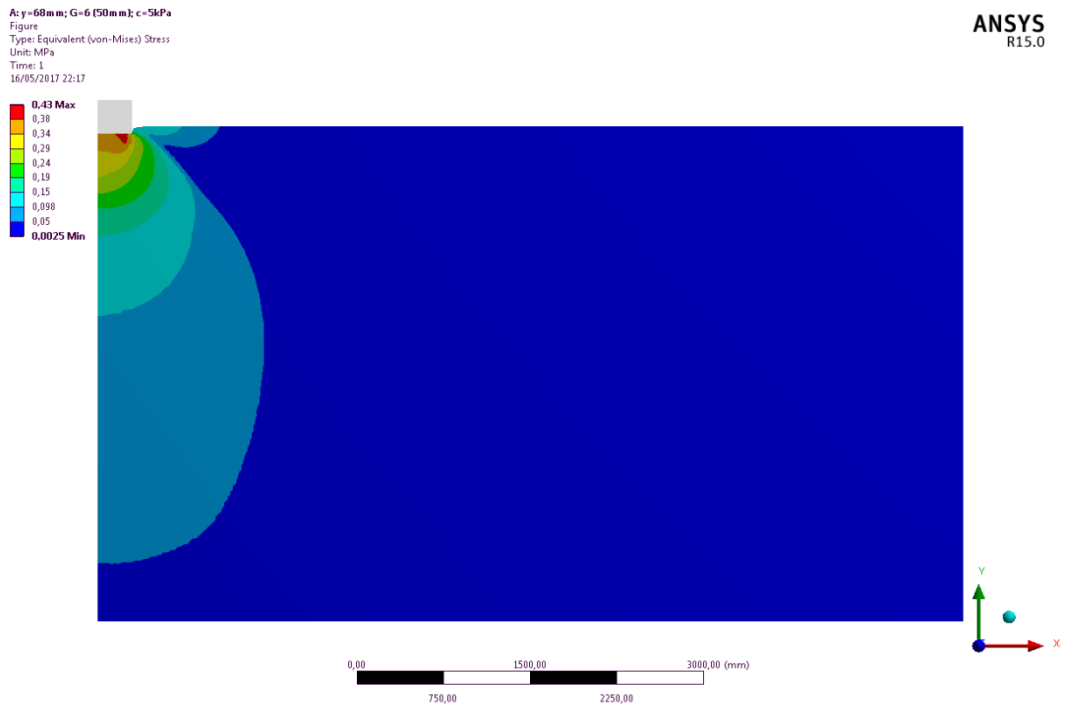


Figura VI.13 Distribución de la tensión equivalente en la falla

Capítulo VII

ESTUDIO DE MICROPILOTES

VII.1 Introducción

Se realizó la modelación numérica de los diferentes ensayos presentados en el [Capítulo IV](#), en el sitio experimental de Saint Remy, Francia. En los cuales se utilizó las condiciones base de los ensayos, adaptadas a la modelación en elementos finitos. Los resultados obtenidos del modelo FE serán comparados con los resultados de los ensayos experimentales en terreno.

Micropilote aislado

- Ensayo de carga vertical
- Ensayo de carga lateral

Grupo de micropilotes

- Ensayo de carga vertical
- Ensayo de carga lateral

VII.2 Parámetros

VII.2.1 Suelo

El suelo utilizado corresponde a una arena suelta tipo Fontainebleau, (Plumelle et al., 1995). A diferencia del ensayo real en el sitio experimental, en donde el suelo del macizo fue preparado a través de un método (§ IV.4), en el modelo de elementos finitos se consideró como un medio homogéneo.

Tabla VII.1 Características del suelo del ensayo y modelado FE

Ensayo				
Macizo	Densidad seca	γ_d	[kN/m ³]	14.4 - 14.82
	Contenido de agua	w	%	7.9 - 10.8
	Índice de densidad	I_D	-	0.52 - 0.62
Suelo	Módulo presiométrico	E_m	[MPa]	2.2 - 6.3
	Presión límite presiométrica	p_i	[MPa]	0.25 - 0.56
	Resistencia de punta	q_d	[MPa]	0.9 - 3.0
FEM				
Arena	Peso unitario arena	γ	[kN/m ³]	14.82
	Módulo de elasticidad	E	[MPa]	35
	Razón de Poisson	ν	-	0.3
	Tensión de fluencia	y_s	[MPa]	0.2
	Ángulo de fricción	φ	°	35
	Ángulo de dilatancia	ψ	°	35

El modelo constitutivo de Drucker-Prager se utilizó en la caracterización del suelo, Capítulo V, en donde alguno de los parámetros se ingresó al software a través de fórmulas constitutivas.

VII.2.2 Micropilote

Se utilizo micropilotes Tipo II, con encamisado de refuerzo y lechada inyectada por gravedad. A continuación en la Tabla VIII.2 y Fig. VIII.1, presentan los parámetros de diseño en el FEM.

Tabla VII.2 Parámetros utilizados en el diseño del micropilote

FEM				
Micropilote	Longitud anclaje	L	[m]	5
	Diámetro teórico	B	[mm]	100
	Tubo de acero	ϕ	[mm]	40,3/50,3
	Módulo de elasticidad	E_{acero}	[MPa]	$2,1 \cdot 10^5$
	Módulo de elasticidad	E_{lechada}	[MPa]	$1 \cdot 10^4$
	Peso unitario acero	γ_a	[kN/m ³]	76,98
	Peso unitario lechada	γ_l	[kN/m ³]	22,55

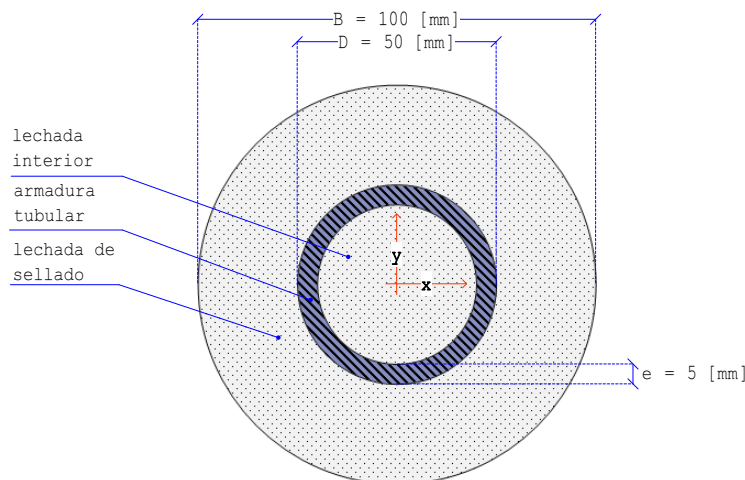


Figura VII.1 Bosquejo del detalle del MP, corte transversal

VII.2.3 Configuración de micropilotes

La modelación se realizó con 2 arreglos de micropilotes verticales, sin inclinación respecto a la superficie del suelo.

- micropilote aislado o individual
- grupo de 4 micropilotes

Se presenta a continuación la configuración de 4 micropilotes, dispuestos en 2 filas. El espaciamiento S entre sus ejes, de dos diámetros ($S = 2 \cdot B = 20$ cm). El grupo de micropilotes está distribuido en una plataforma de prueba de hormigón armado cuadrada de dimensión 40 x 40 x 20 cm, Figura VII.2.

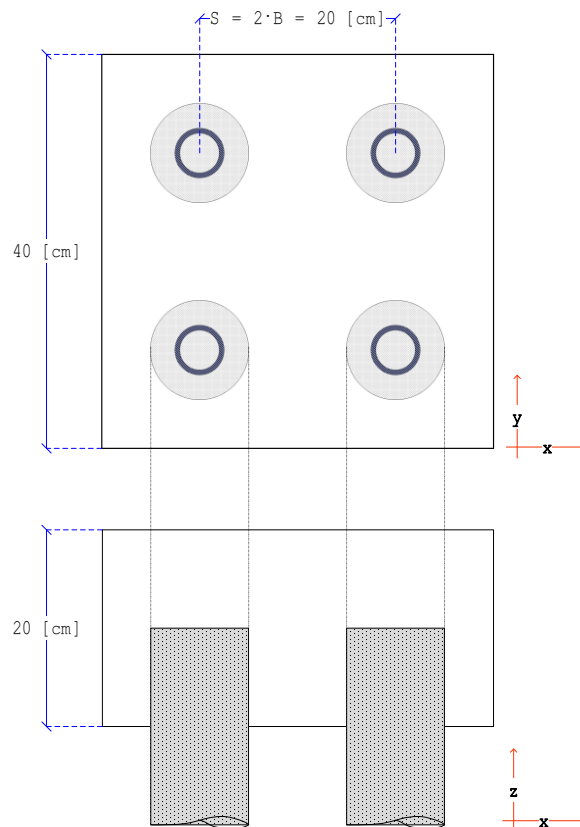


Figura VII.2 Arreglo del grupo 4 micropilotes en la plataforma de hormigón, vista en planta y lateral

Cabe señalar que la plataforma de carga está a una altura de 10 cm sobre la superficie del suelo, y los micropilotes se encuentran empotrados en la mitad de ella.

VII.2.4 Malla de elementos finitos

VII.2.4.1 Micropilote aislado

En las Figuras VII.3, VII.4, VII.5, VII.6 y VII.7 se presenta en detallé las distintas vistas del mallado utilizado en la modelación FE en el micropilote aislado. Se muestra la mitad del dominio analizado y utilizado debido a la simetría del problema.

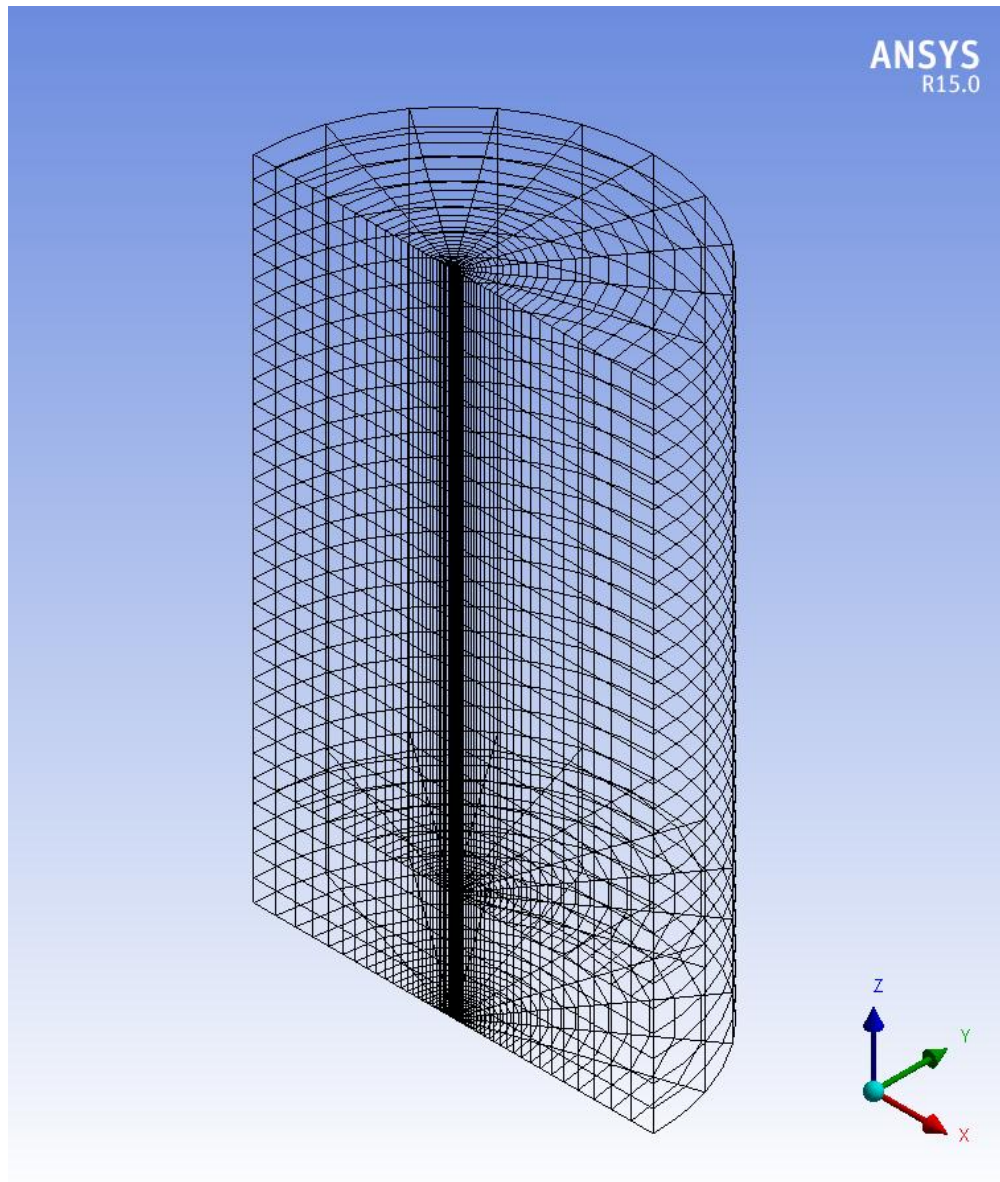


Figura VII.3 Grilla 3D FEM micropilote aislado

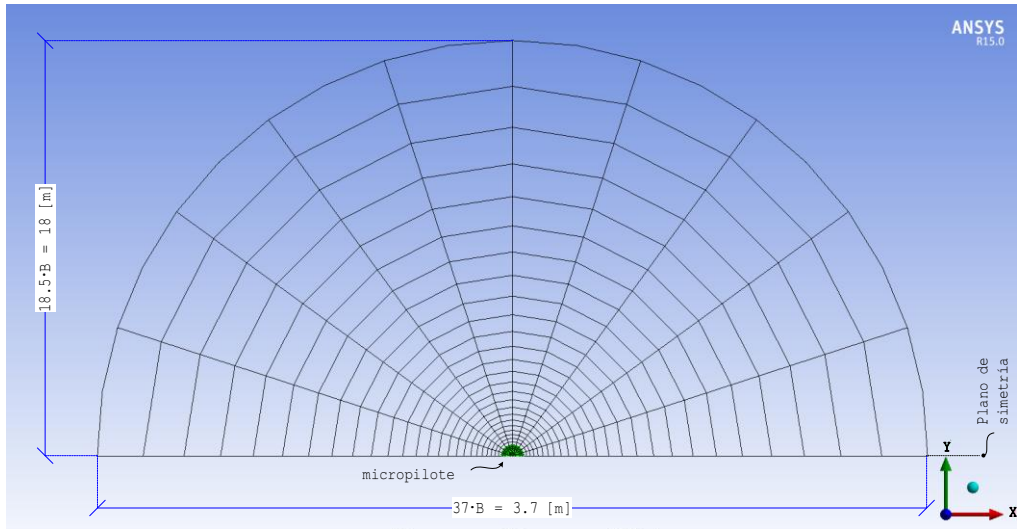


Figura VIII.4 Vista en planta

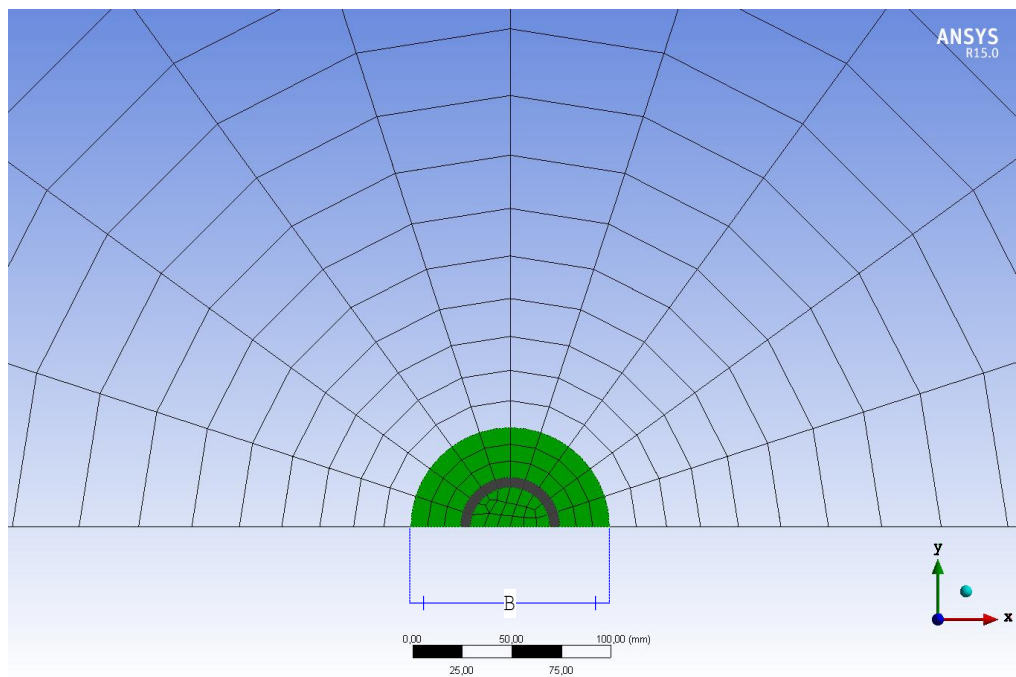


Figura VII.5 Detalle área sección micropilote

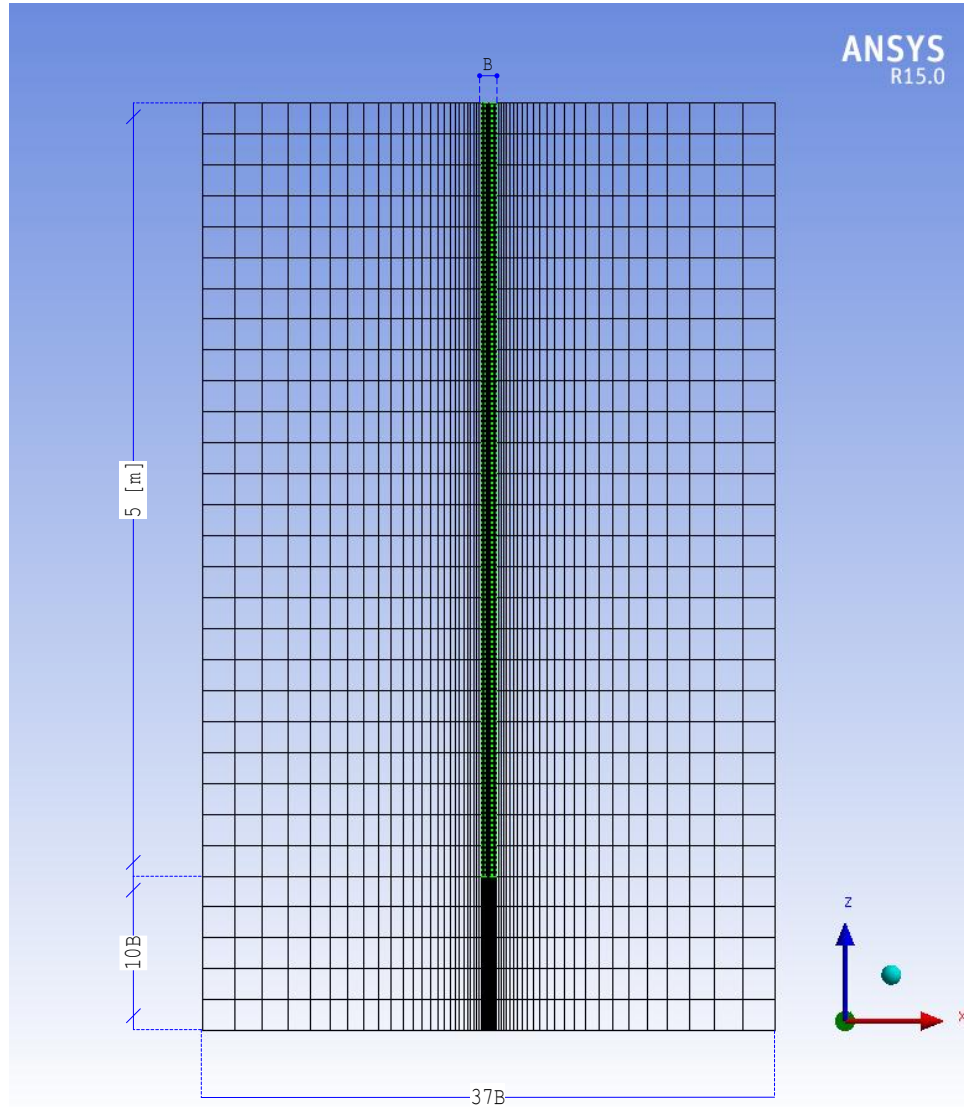


Figura VII.6 Vista frontal FEM micropilote aislado

El detalle de la unión entre la punta del micropilote y el suelo se presenta en la Figura VII.7, la unión es nodo a nodo sin elementos de espaciamento en el interfaz. Además se presenta el dimensionamiento de la grilla en el eje vertical de 200 [mm] .

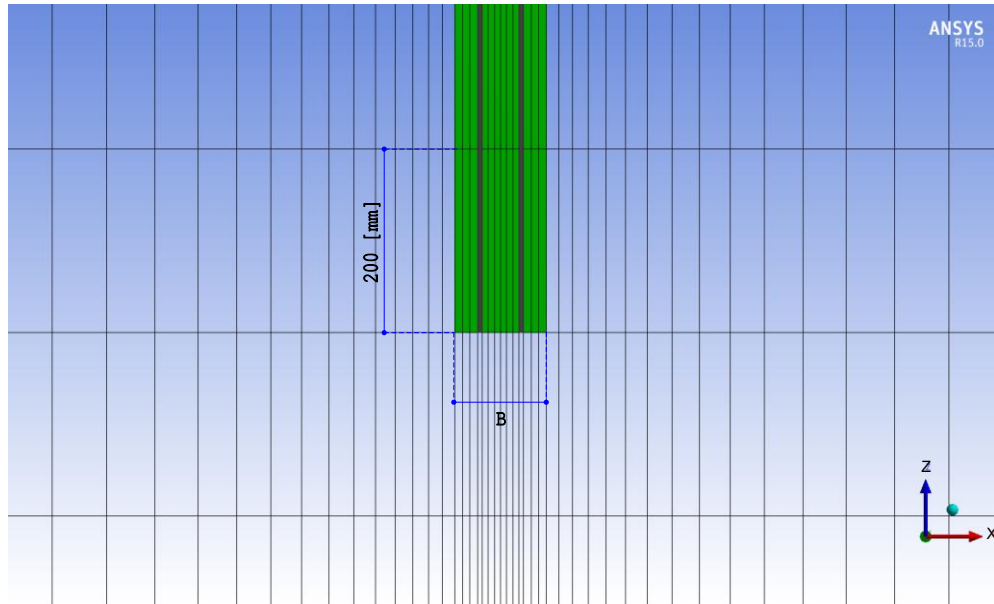


Figura VII.7 Detalle sección punta micropilote

VII.2.4.2 Grupo micropilote

Las Figuras VII.8, VII.9, y VII.10 muestran el dominio cilíndrico para el análisis del grupo de 4 micropilotes, en donde se presenta en detallé las distintas vistas del mallado utilizado en la modelación FE.

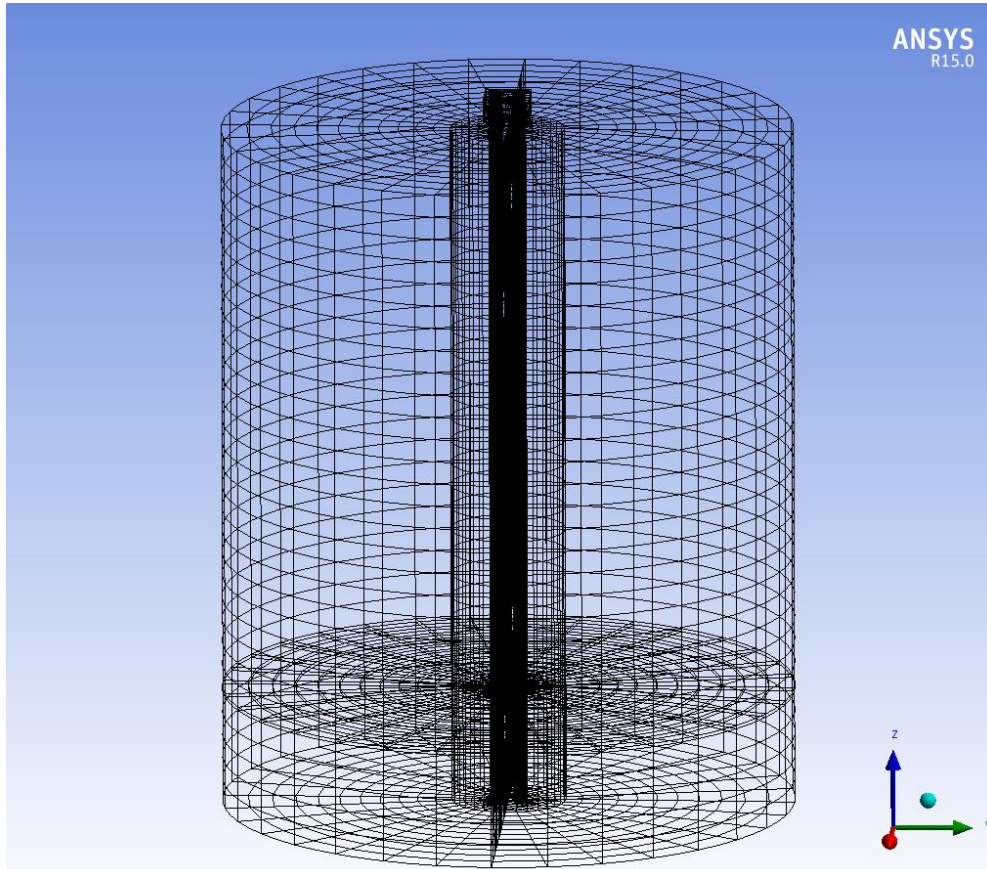


Figura VII.8 Grilla 3D FEM grupo de micropilotes

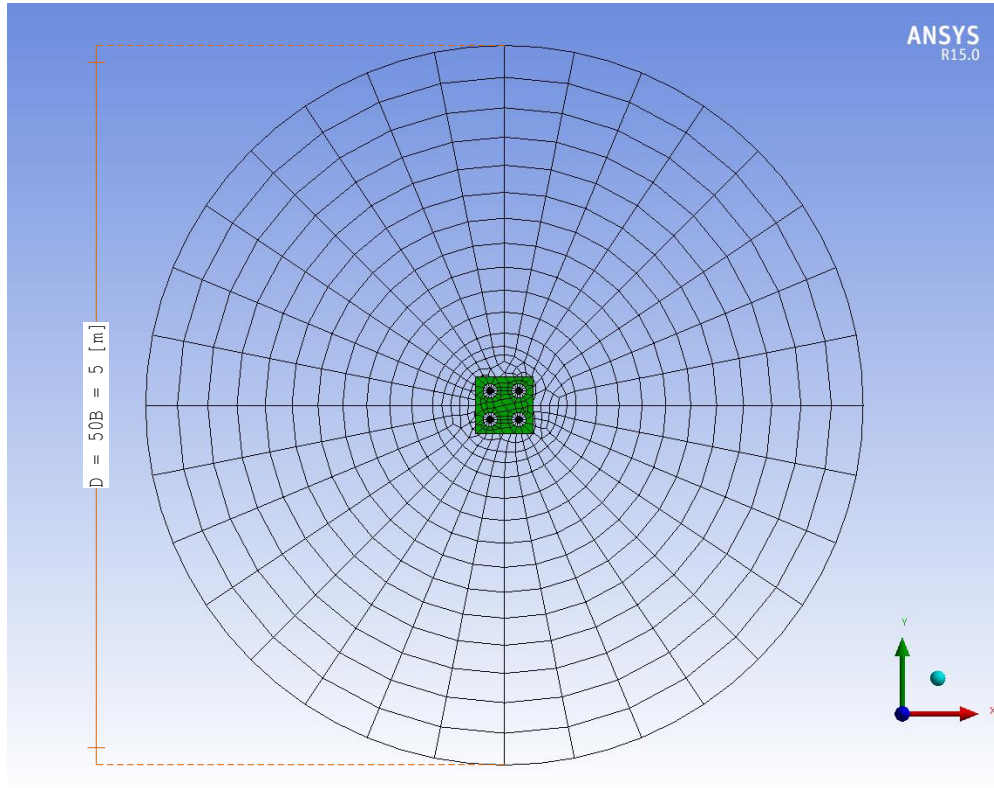


Figura VII.9 Vista en planta grupo de micropilotes

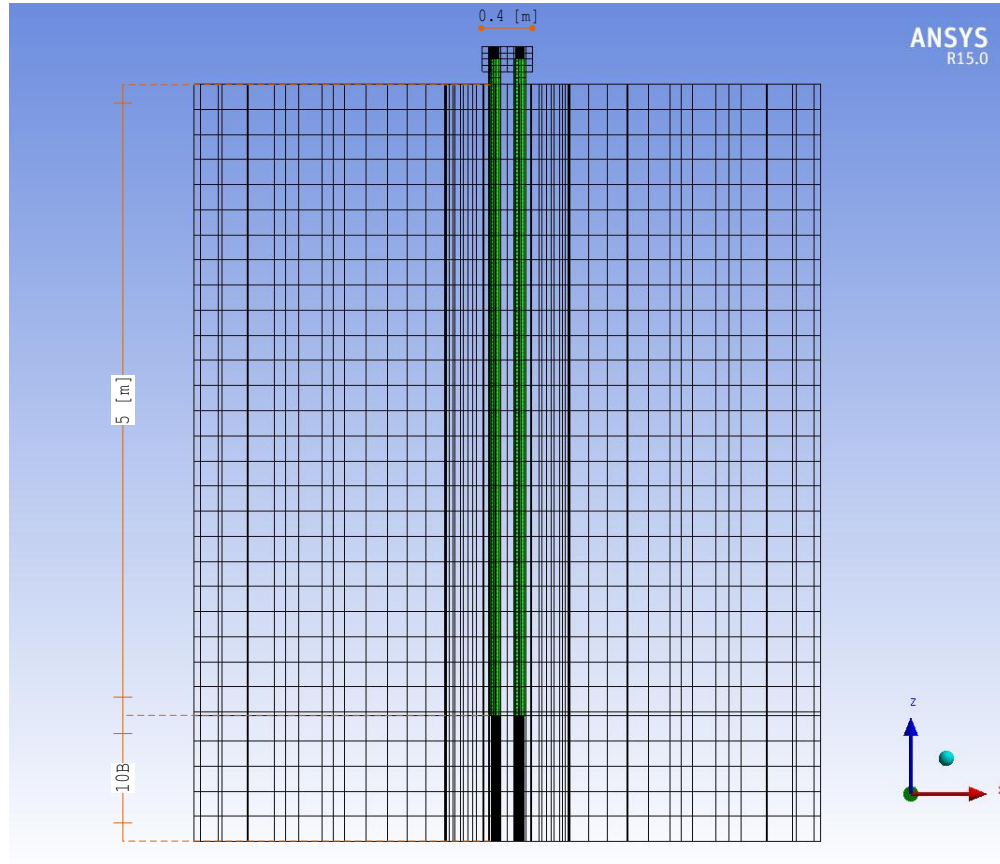


Figura VII.10 Vista frontal grilla grupo de micropilotes

VII.2.5 Carga aplicada en micropilotes

La modelación de elementos finitos FEM, se realizó en régimen de carga estática. La condición de carga general en el FEM de micropilotes, es la presión en reposo del suelo que actúa sobre el micropilote y el peso propio de los elementos estructural que lo componen. Las cargas puntuales fueron aplicadas en la parte superior del micropilote.

Empuje en reposo: se utilizó

$$\sigma_h = k_0 \cdot \gamma_{suelo} \cdot z \quad [\text{VII.1}]$$

donde k_0 se obtiene de la Ec. de reducida de Jaky para suelos granulares, γ_{suelo} peso unitario del suelo y z , la profundidad de este hasta la base del micropilote.

$$k_0 = 1 - \text{sen}(\phi) \quad [\text{VII.2}]$$

con, ϕ ángulo de fricción interna.

Peso propio: se aplicó la suma total de cada componente del micropilote, como una carga puntual adicional.

- Peso micropilote = 1080 [N]
- Peso placa de carga = 840 [N]

Carga total, correspondiente al ensayo de los 4 micropilotes $P = 5160$ N.

En el modelo aislado, donde se utilizó la condición de simetría axial, solo se aplicó la carga correspondiente a medio micropilote $P = 540$ N.

VII.2.5.1 Carga vertical

Se aplico el desplazamiento en la parte superior, correspondiente al obtenido en el ensayo real para el estado de carga máxima, al cual se obtuvo la fuerza resultante.

- Micropilote aislado: $d = 19$ [mm]
- Grupo de micropilote: $d = 15$ [mm]

VII.2.5.2 Carga lateral

Se aplicó fuerza lateral en la parte superior del micropilote, correspondiente a la fuerza máxima obtenida del ensayo real de carga.

- Micropilote aislado: $F = 11.000$ [N]
- Grupo de micropilote: $F = 40.000$ [N]

VII.2.6 Vinculación del tope

Al tope del micropilote se le restringió el giro para simular la condición de empotrado en la placa de carga, como se realizó en los ensayos del grupo de micropilotes.

Capítulo VIII

RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos de los modelos numéricos en elementos finitos. Se realiza la comparación entre los resultados numéricos y los resultados obtenidos en los ensayos de carga a escala real realizados en el sitio experimental de Saint Rémy presentado en el Capítulo VII.

Los resultados son presentados por la distribución de estos, en primer lugar el micropilote aislado, seguido por el grupo de micropilotes. Se presentan las curvas tenso-deformacional del suelo, de estructura deformada y de la zona de influencia de la deformación en la interacción arena-micropilote.

Además se incluye el análisis paramétrico de los modelos FE, con el fin de conocer el comportamiento de estos, los parámetros que fueron evaluados son los siguientes:

- Módulo de elasticidad del suelo, E_s .
- Dimensionamiento del mallado del modelo FE.
- Intensidad de carga aplicada a los modelos FE.

VIII.1 Micropilote aislado

VIII.1.1 Carga vertical

El micropilote bajo carga vertical en el tope, posee una zona de influencia de forma cónica que representa la deformación vertical tanto del micropilote como del suelo, bajo la carga axial aplicada en la cabeza de este. Esta alcanza su mayor rango en el tope del micropilote, luego disminuyendo hasta la base de este, siendo casi imperceptible en la punta. En el tope alcanza un diámetro de 900 mm, en un rango de 2 a 4 mm de deformación axial del suelo circundante al micropilote, el micropilote presenta un desplazamiento máximo de 19 mm hasta la longitud $l/2$, luego presenta una leve disminución hasta la base.

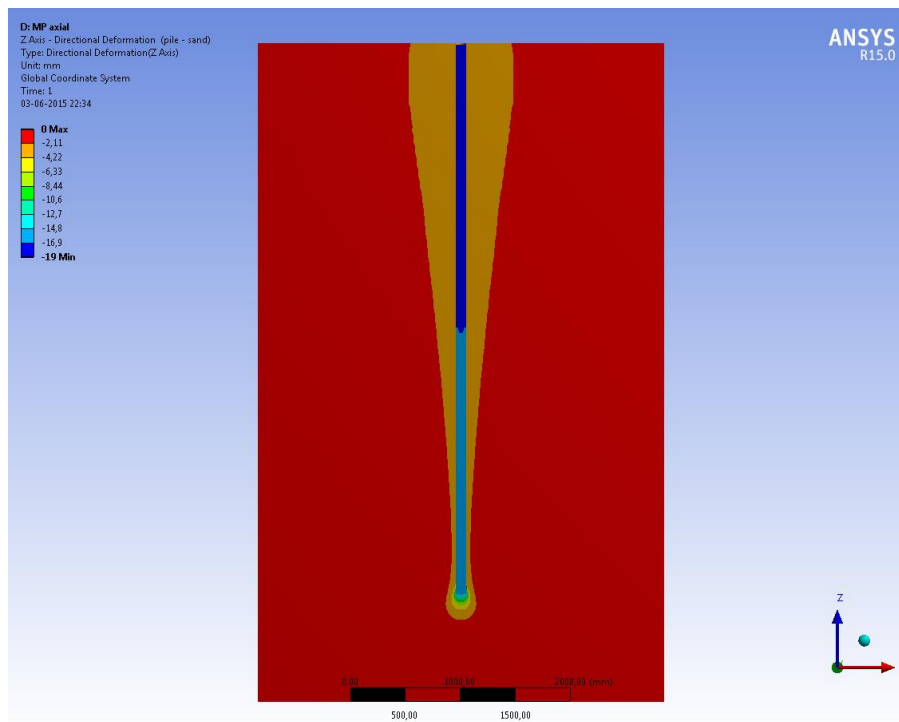


Figura VIII.1 Distribución de deformación bajo carga vertical en FEM, micropilote individual

La deformación vertical reflejada en la zona influencia, se produce por la interacción del enlace suelo-lechada realizado a través del fuste del micropilote, este mecanismo genera el traspaso de carga desde el micropilote hasta el suelo circundante a través de la fricción. La capacidad de enlace a lo largo de todo el fuste es en promedio de 114 MPa.

La Figura VIII.2 muestra las curvas de carga axial - asentamiento vertical en el modelo numérico FEM y en el ensayo presentado en el estudio de FOREVER.

La fase de carga de desplazamiento controlado correspondiente al máximo obtenido del ensayo en FOREVER, aplicado en tope del micropilote da como resultado la fuerza de reacción del sistema suelo-estructura, la curva obtenida de la modelación numérica es similar en trayectoria a la obtenida por el ensayo real pero con menor rigidez, ya en el punto de falla del enlace las curvas presentan un comportamiento similar. El resumen de los datos obtenidos de los ensayos, se presentan en la Tabla VIII.1.

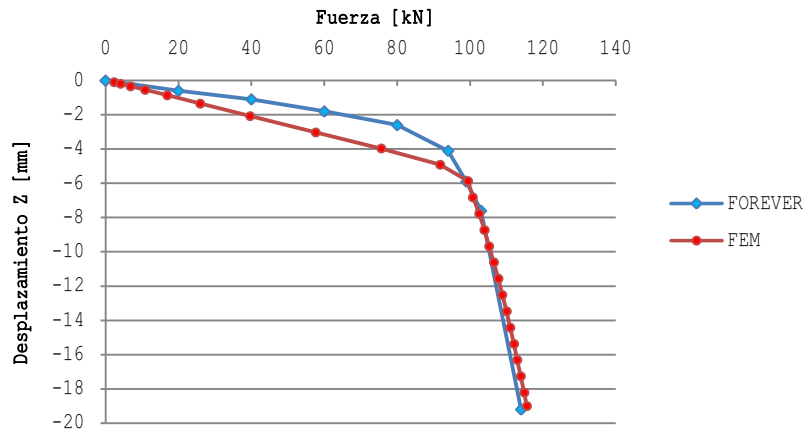


Figura VIII.2 Curva carga-desplazamiento vertical, micropilote aislado

Tabla VIII.1 Resultados carga vertical, ensayo y modelo FE en micropilote aislado

Micropilote	Q_c [kN]	S_{qc} [mm]	S_{me} [mm]	$Q_{1e}^{(0.1B)}$ [kN]	Q_c/Q_{1e}	Q_{me} [kN]	q_{se} [kPa]
ensayo	98	5.9	19.2	106	0.92	114	52
modelo	96	6	19	103	0.93	115	114
Δ	2	0.1	0.2	3	0.01	1	62

- Q_c : carga de fluencia crítica
- S_{qc} : desplazamiento bajo la carga crítica
- S_{me} : desplazamiento máximo correspondiente a la carga máxima
- Q_{1e} : carga límite convencional determinada del ensayo de carga para el desplazamiento medido de la cabeza del micropilote a $0.1 \cdot B = 10$ mm
- Q_c/Q_{1e} : relación entre la carga de fluencia crítica y la carga límite convencional
- Q_{me} : carga máxima aplicada al micropilote
- q_{se} : fricción límite promedio del fuste del micropilote

VIII.1.2 Carga lateral

La Figura VIII.3 muestra la distribución de forma cónica de deformación de la interacción micropilote-arena, la zona de influencia, alcanza la profundidad de 1.25 m en el eje vertical Z, 2.25 m de ancho en la superficie en el eje horizontal X y 1.6 m en el eje Y.

La longitud de transferencia de carga al suelo $l_0 = 1.15$ m, la cual se observa que coincide con la zona de influencia de deformación en la profundidad. Bajo el criterio de pilote infinitamente largo $l \geq 3 \cdot l_0$, se cumple la condición ya que $l = 5$ m $\geq 3 \cdot l_0 = 3.45$ m, por lo que se considera pilote infinitamente largo.

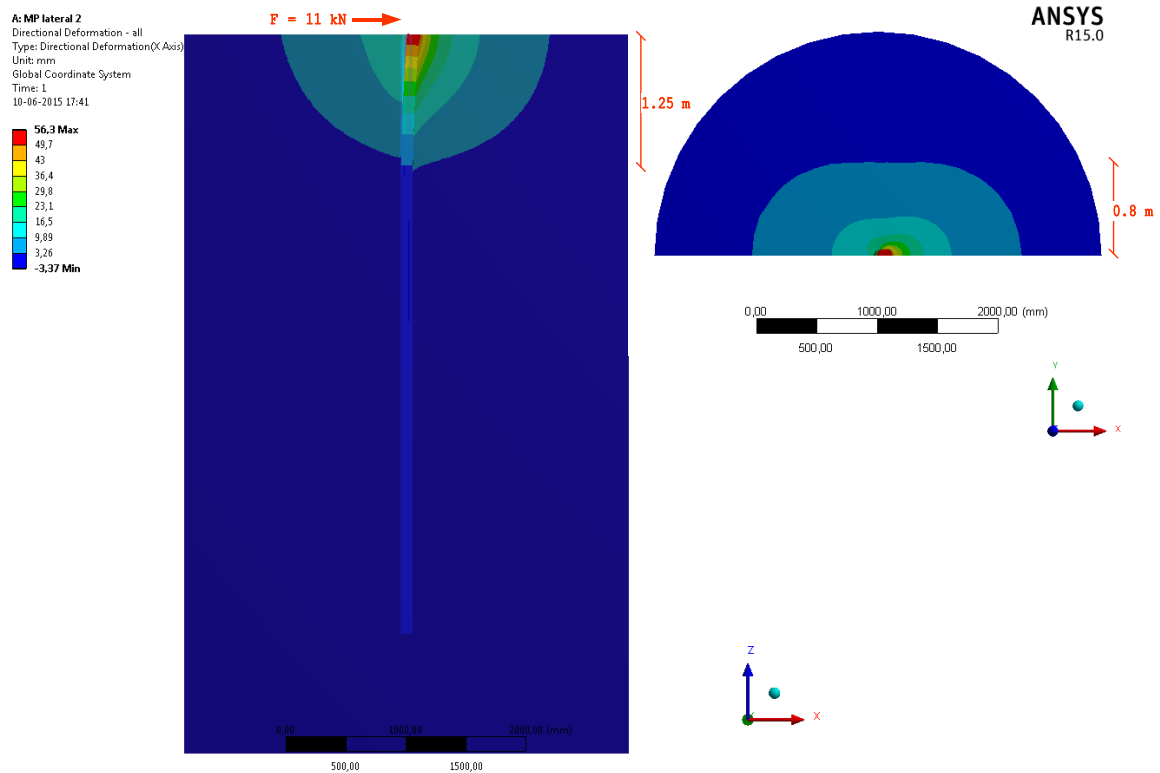


Figura VIII.3 Distribución de desplazamiento horizontal bajo carga lateral en FEM, micropilote individual

En la Figura VIII.4, se muestran las curvas de carga horizontal vs desplazamiento lateral en el micropilote aislado. La deformación máxima es de 56 mm a una carga aplicada de 11 kN en el caso del ensayo realizado en FOREVER.

En el caso realizado en el modelo FE se presentan las curvas de reacción hasta la carga puntual de 11 kN aplicada en el tope del micropilote, analizadas de manera independiente según componente del modelo, siendo estos el micropilote (mp), intersección micropilote-suelo (mp-soil) y suelo (soil).

El comportamiento presentado por el micropilote y el del eje micropilote-suelo es lineal-elástico, cual es de mayor rigidez que el elasto-plástico de Drucker-Prager utilizado en el modelo constitutivo del suelo. De las cuales se obtienen los siguientes valores:

- La curva obtenida de reacción del suelo (soil), dio como resultado un desplazamiento máximo de 55 mm a una fuerza de reacción de 8.7 kN.
- La curva obtenida de reacción del eje (mp-soil), dio como resultado un desplazamiento máximo de 55 mm a una fuerza de reacción de 12.1 kN.
- La curva de reacción del micropilote (mp), dio como resultado un desplazamiento máximo de 55 mm a una fuerza de reacción de 12.7 kN.

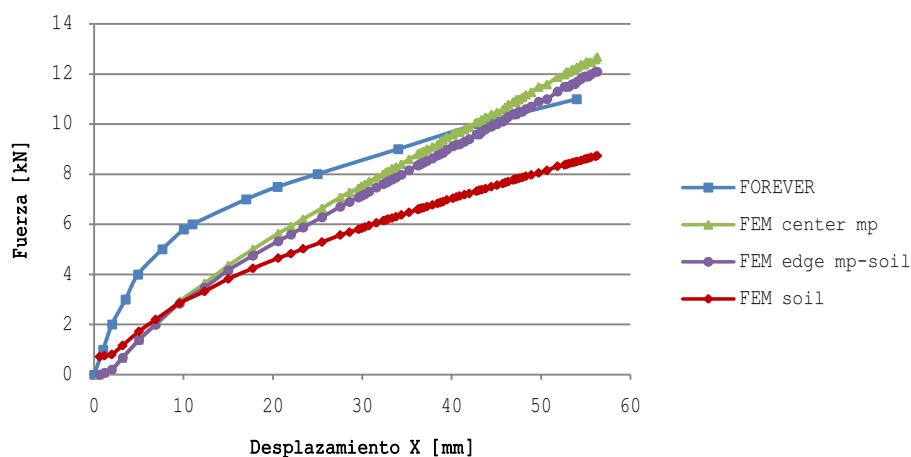


Figura VIII.4 Curva carga-desplazamiento lateral, micropilote individual

El modelo no reproduce de manera correcta la respuesta medida en el ensayo real en Saint Remy.

En la Fig. VIII.5 se compara la curva de FOREVER con la obtenida de la interacción suelo-micropilote en conjunto del modelo FE. La curva de reacción del sistema en conjunto obtenida del modelo FE difiere de la curva del ensayo en FOREVER.

Esta diferencia se presenta con mayor intensidad en la zona de comienzo de plastificación del suelo en el rango de 5 – 15 mm de desplazamiento, con una variación en promedio de 2 kN. Luego la diferencia se aminora hasta alcanzar la fuerza de 11 kN a un desplazamiento de 55 mm junto con la del ensayo a escala real.

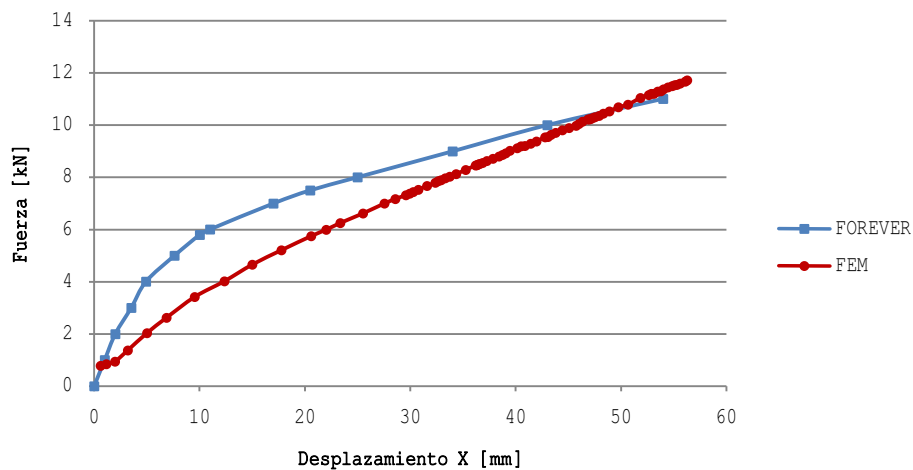


Figura VIII.5 Curva carga-desplazamiento lateral, micropilote individual

VIII.1.2.1 Estructura deformada

En la Figura VIII.6, se muestra la estructura deformada resultante del micropilote, en la profundidad de 1.3 m interseca el eje neutro en X pasando por 0, desde la superficie.

Al esfuerzo externo de 11 kN se obtuvo una deflexión de 56 mm equivalente 50% del diámetro del micropilote, esto presenta la característica flexible de los micropilotes a diferencia de los pilotes rígidos convencionales. El equilibrio de esfuerzos se produce dentro de $l/3$, siendo l la longitud del mp. Bajo $l/3$ la transferencia (deformación) de carga hacia el suelo es prácticamente nula.

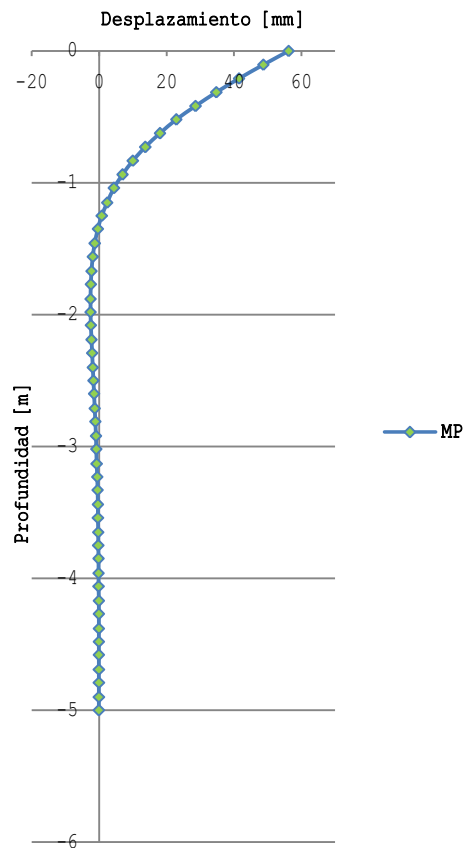


Figura VIII.6 Deformación bajo carga lateral, micropilote individual

VIII.2 Grupo de micropilotes

VIII.2.1 Carga vertical

En la Figura VIII.7 se observa la zona de influencia obtenida al aplicar la carga vertical al modelo FE, se grafica la deformación direccional en el eje Z de forma cónica. Dividiendo el modelo en bandas de contorno, la zona más externa ($d > 2.4$ m) del modelo varía en un rango de 0 – 1.67 mm, la zona media ($2.4 \text{ m} \geq d \geq 0.5$ m) posee un rango de 1.67 – 3.33 mm y la zona central ($d < 0.5$ m) posee 3.33 a 5 mm de deformación del suelo circundante al grupo de micropilotes. La placa de carga presenta un asentamiento de 15 mm equivalente a la carga aplicada en el ensayo a escala real del modelado.

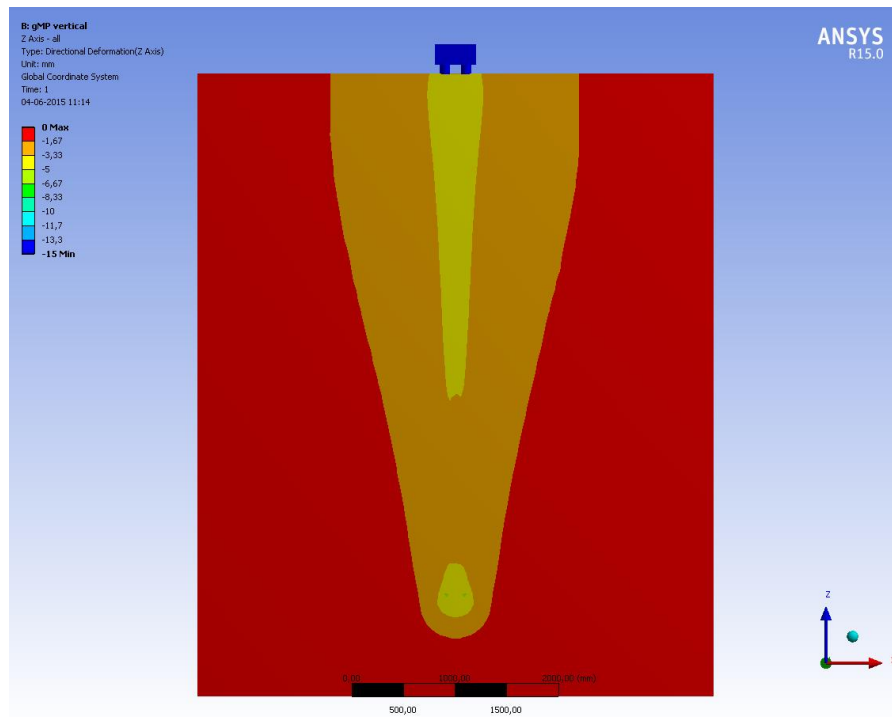


Figura VIII.7 Distribución de deformación bajo carga vertical en FEM, grupo de micropilotes

La deformación direccional vertical en los elementos de suelo, producida por la fricción del enlace suelo-lechada, en el modelo FE se obtuvo una fricción promedio en el fuste de 55 kPa, el máximo alcanzó los 85 kPa y es donde se produce el deslizamiento a un desplazamiento alcanzado de 6 mm. La tensión de fricción se inicia 34 kPa, siendo esto la adherencia del contacto inicial.

La Figura VIII.8 presenta la presión generada en el fuste (interface) de los 4 micropilotes al aplicar la carga vertical, junto con la grafica de la fricción generada en este.

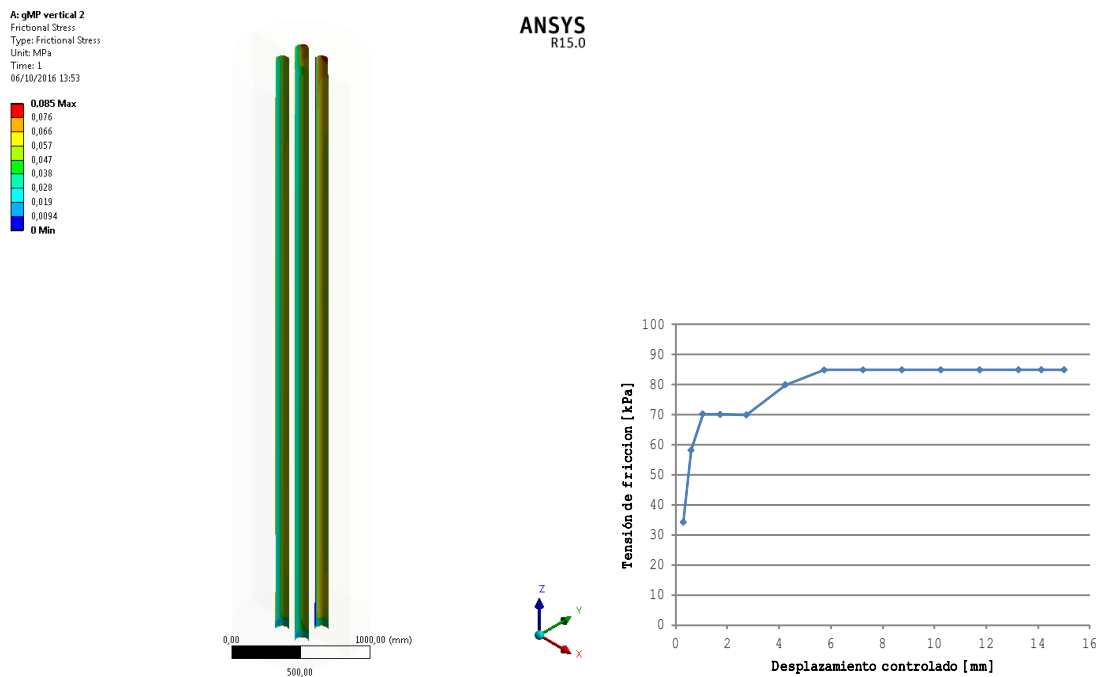


Figura VIII.8 Fuste generado en el enlace suelo-micropilotes

En la Figura VIII.9 se presenta la curva de carga axial - desplazamiento vertical del ensayo de carga vertical en el grupo de cuatro micropilotes realizado en el sitio experimental de Saint-Remy, junto con la curva desarrollada por el grupo de cuatro micropilotes realizado en la modelación numérica en elementos finitos FE.

El resultado obtenido del modelo FE entrega una fuerza resultante a un desplazamiento dado, en este caso de 15 mm aplicado en el tope del micropilote. La curva presenta una tendencia bi-lineal, con rigidez menor al del ensayo, la fluencia se produce en el desplazamiento de 5.7 mm con fuerza resultante de 403 kN.

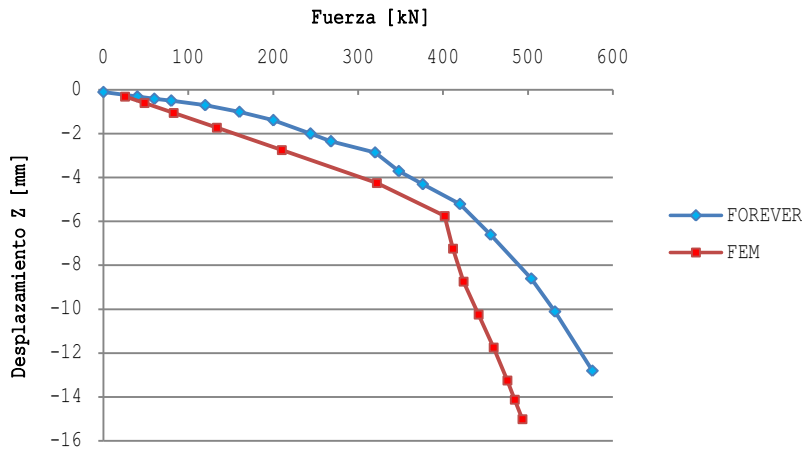


Figura VIII.9 Curva carga-desplazamiento vertical, grupo de micropilotes

En la Tabla VIII.2 se presenta el resumen de los valores principales del comportamiento de los micropilotes, para el modelo FE y el ensayo en FOREVER, presentando la diferencia obtenida entre ellos.

Tabla VIII.1 Resumen de cargas vertical, ensayo y modelo del grupo de 4 micropilotes

Micropilote	Q_c [kN]	S_{qc} [mm]	S_{me} [kPa]	$Q_{1e}(0.1B)$ [kN]	Q_e/Q_{1e}	Q_{me} [kPa]	q_{se} [kPa]
ensayo	420	5.2	12.8	532	0.78	576	52
modelo	403	5.7	13.2	442	0.81	493	55
Δ	17	0.5	0.4	90	0.12	83	3

- Q_c : carga de fluencia crítica
- S_{qc} : desplazamiento bajo la carga crítica
- S_{me} : desplazamiento máximo correspondiente a la carga máxima
- Q_{1e} : carga límite convencional determinada del ensayo de carga para el desplazamiento medido de la cabeza del micropilote a $0.1 \cdot B = 10$ mm
- Q_c/Q_{1e} : relación entre la carga de fluencia crítica y la carga límite convencional
- Q_{me} : carga máxima aplicada al micropilote
- q_{se} : fricción límite promedio del fuste del micropilote.

La Figura VIII.10 muestra la curva fuerza resultante vs desplazamiento vertical, en el grupo de cuatro micropilotes comparado con la curva desarrollada en el modelo FE de un micropilote aislado del mismo tipo.

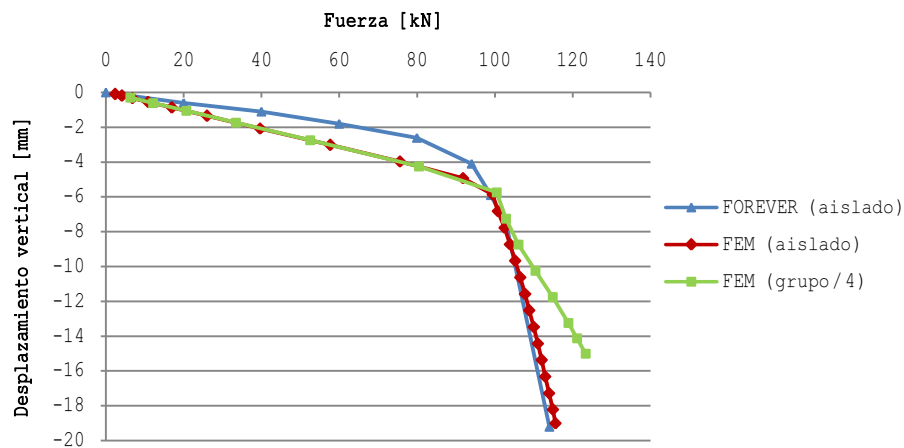


Figura VIII.10 Comparación de curvas de carga vertical entre el grupo de 4 micropilotes (Tipo II) y el micropilote aislado del mismo tipo

Se calcula el coeficiente de C_e (Ec. IV.9), en donde la carga límite del micropilote aislado, se utilizó el resultado del modelo FE bajo carga vertical del mismo tipo de micropilote.

La Tabla VIII.3 presenta el coeficiente de eficiencia C_e para el grupo de micropilotes en los 3 valores de carga límite: Carga de fluencia Q_c , carga límite Q_{1e} correspondiente al desplazamiento de $0.1B$, y el valor máximo alcanzado durante la modelación numérica Q_{me} .

Tabla VIII.2 Coeficiente de eficiencia de grupos para diferentes valores de carga axial

	Tipo	Carga [kN]		C_e
		Grupo (4 MP)	Aislado (1 MP)	
Q_c	FOREVER	420	98	1.07
	FEM	403	96	1.05
Q_{1e}	FOREVER	532	106	1.25
	FEM	438	103	1.06
Q_{ne}	FOREVER	576	114	1.26
	FEM	493	115	1.07

Los resultados indican un positivo efecto grupal ($C_e > 1$), tanto para el grupo de micropilotes realizado en la modelación numérica (FEM) como en el ensayo a escala real (FOREVER), el coeficiente de eficiencia es mayor a 1. Para el grupo de micropilote en el ensayo en FOREVER el C_e es superior al obtenido en el grupo de micropilotes en el modelo FE. La similitud de los resultados obtenidos es debido a que los modelos numéricos fueron realizados con la mayor semejanza posible a los ensayos a escala real. Para el espaciamiento utilizado de $S = 2 \cdot B$, siendo B el diámetro utilizado en los micropilotes y $N = 4$, siendo el número de micropilotes en el grupo, el coeficiente de eficiencia C_e obtenido en los modelos al igual que en el ensayo se encuentra bajo en el rango establecido por Vesic (1969), el cual concluye que para grupo de 4 micropilotes y un espaciamiento de S de 2B el $C_e = 1.2$, aunque el efecto de grupo es máximo para espaciamiento S entre 3B y 4B. Producto al número N reducido de micropilotes en el grupo y a la no posible utilización de una metodología en la ejecución de los micropilotes de los modelos numérico, es que en este tipo de comportamiento no genera un alto confinamiento del suelo por lo que la capacidad de carga del grupo tiende hacia al aislamiento de los micropilotes $C_e = 1$. A diferencia del presentado en el ensayo a escala real en FOREVER donde al ser MP Tipo II inyectado por gravedad, genero un grado de confinamiento produciendo un mayor coeficiente $C_e \approx 1.2$. Para obtener mayor claridad del comportamiento del grupo de micropilotes en los modelos numéricos, es necesario realizar un análisis de elementos finitos FEA, en donde la variación de parámetros tales como, espaciamiento de micropilotes S, numero de micropilotes N, densidad del suelo, rugosidad y longitud de estos, y una no homogeneidad en la grilla, con el fin de simular en mayor grado la constitución de los suelos. Son necesarios para establecer valores comparativos en la eficiencia.

VIII.2.2 Carga lateral

En la Figura VIII.11 se observa la distribución de deformación, similar a la ocurrida en el micropilote aislado de forma cónica, la zona de influencia alcanza la profundidad de 1.55 m en el eje Z, 3.3 m en la superficie, eje X dirección de la carga y 2.45 m en el eje Y perpendicular a la carga.

Se observa en las isolíneas producidas por el modelo, que la sección frontal a la dirección de la carga (zona en compresión) el alcance de la distribución de deformación posee mayor profundidad que la zona posterior a la carga (zona en extensión).

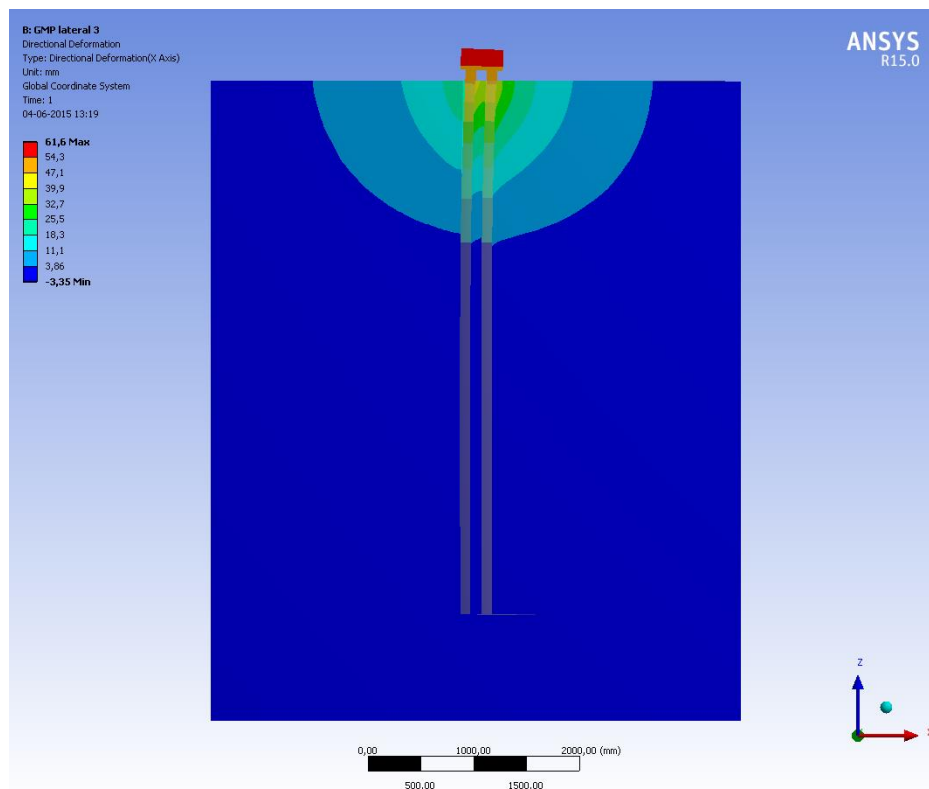


Figura VIII.11 Distribución de desplazamiento horizontal bajo carga lateral en FEM, grupo de 4 micropilotes

El rango de deformaciones elástico se muestra en la Figura VIII.12, presente en tres planos diferentes, esta zona presenta las deformaciones no permanentes en el suelo debido a la carga aplicada. Una leve diferencia se produce entre el suelo circundante de los micropilotes frontal y posterior a la carga, en los micropilotes posterior se obtuvo un rango de $0.3 - 0.22$ mm/mm de deformación elástica a diferencia a los frontal donde se obtuvo un rango menor de $0.22 - 0.20$ mm/mm en la zona más desfavorable. Punto en contacto de la resistencia activa del suelo. Esto debe ser por el efecto de confinamiento que se genera en la zona central de los micropilotes, produciendo un menor rango de movilidad del suelo.

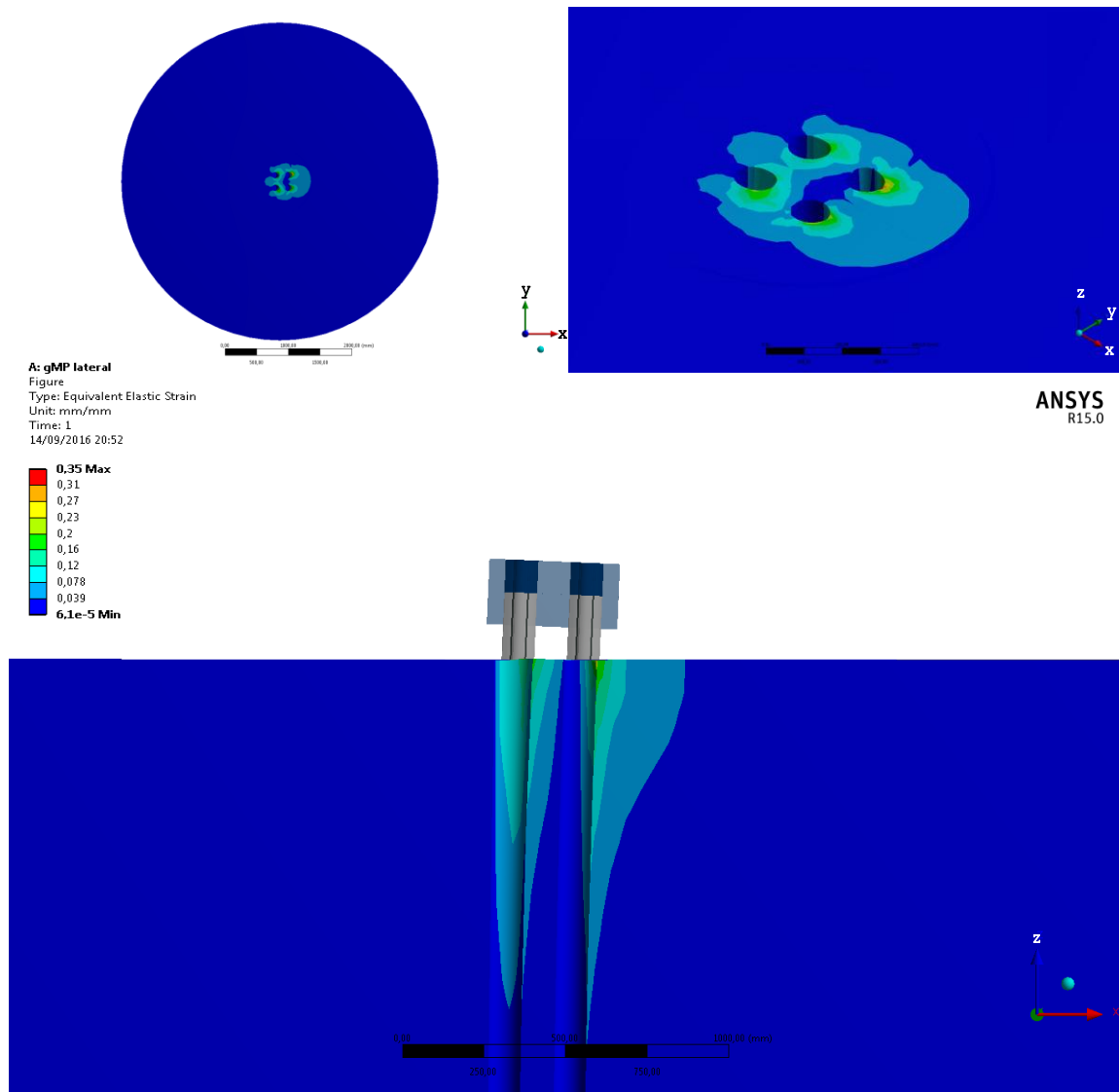


Figura VIII.12 Rango de deformación elástica

Figura VIII.13 presenta la zona donde ocurre la deformación plástica producida en el suelo, se observa que esta resulta en mayor parte al costado exterior de los micropilotes adyacente a la carga. Donde se obtuvo el rango máximo de 0.14 mm/mm.

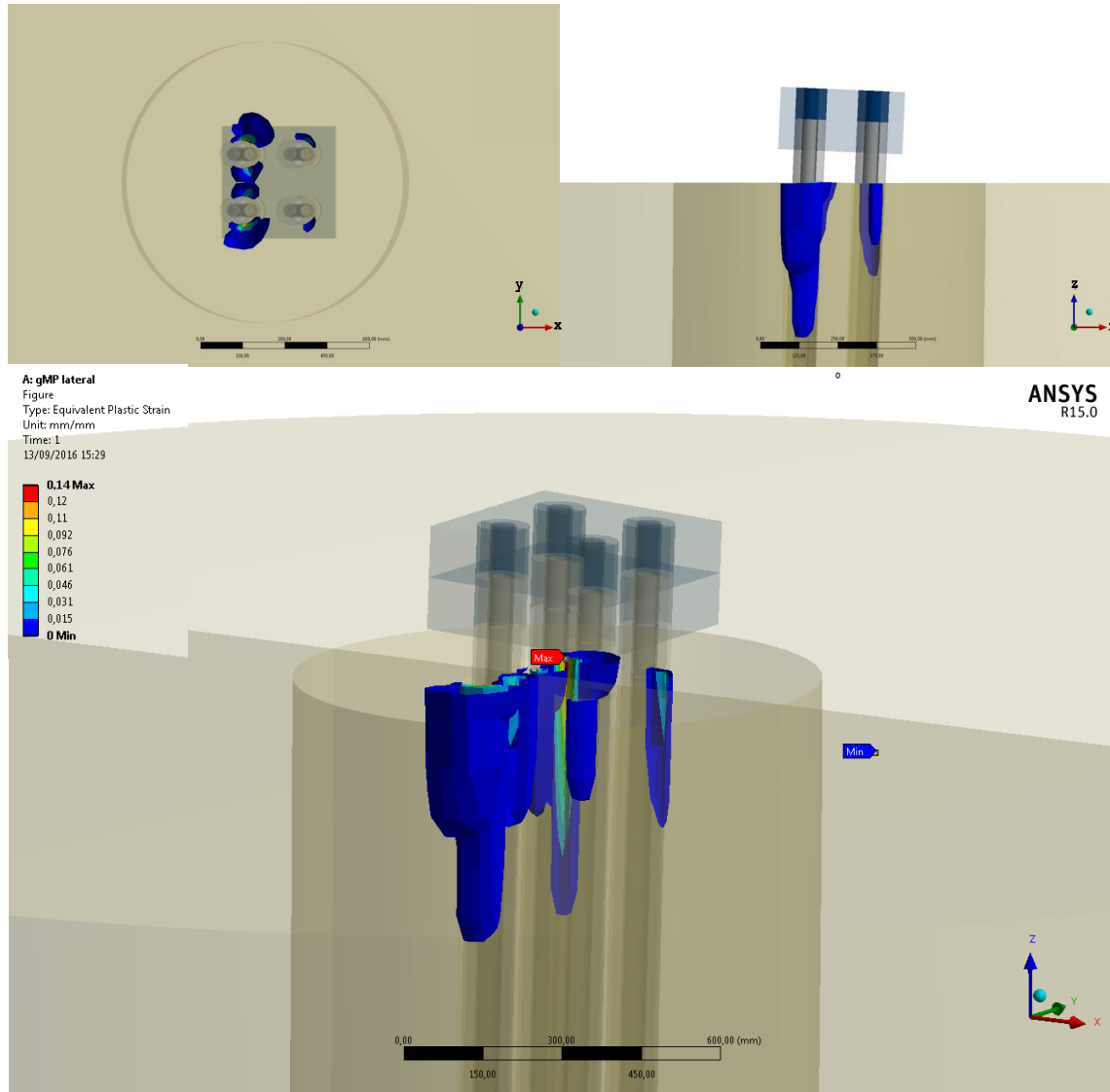


Figura VIII.13 Rango de deformación plástica

Los esfuerzos generados tras la aplicación de la carga (Fig. VIII.14), son transmitidos desde los micropilotes al suelo, se observa que los esfuerzos producidos por los micropilotes adyacentes a la carga se sobreponen con los de los micropilotes posterior a la carga, este es un fenómeno llamado efecto sombra, el cual puede producir la reducción de la capacidad de carga de los micropilotes.

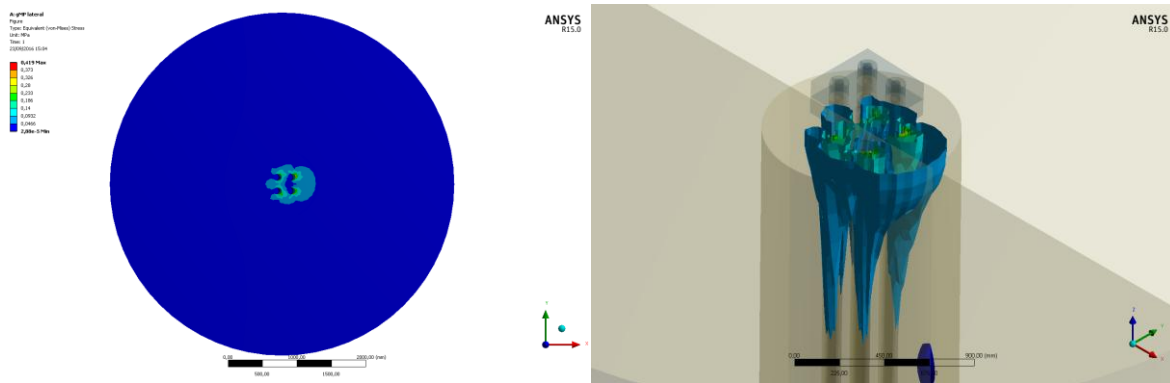


Figura VIII.14 Distribución de esfuerzos

En la Figura VIII.15, se muestra la curva de carga lateral - desplazamiento horizontal en el grupo de 4 micropilotes. La deformación máxima es de 61.6 mm a la altura de la placa de carga y de 55 mm en la superficie del suelo bajo una carga aplicada de 40 kN. La respuesta obtenida del modelo FE lineal, no refleja el comportamiento real obtenido del ensayo a escala real del grupo de micropilotes.

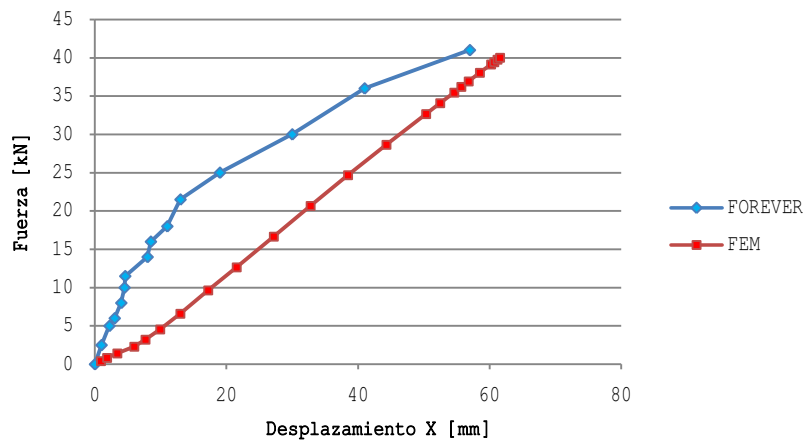


Figura VIII.15 Curva carga-desplazamiento lateral, grupo de 4 micropilotes

VIII.2.2.1 Estructura deformada

En la Figura VIII.16, se muestra la estructura deformada resultante de 1 micropilote del grupo, a la profundidad de 1.3 m la curva pasa por 0 en el eje X, desde la superficie. Se aprecia una deformada representativa de un pilote flexible bajo carga lateral.

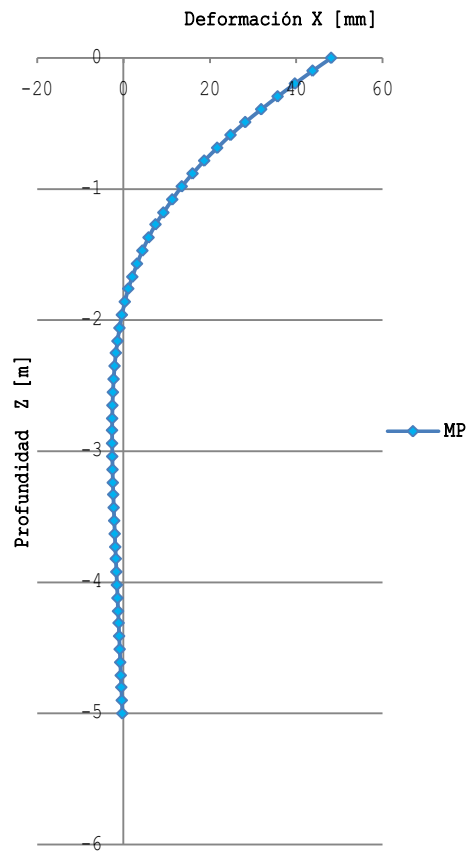


Figura VIII.16 Deformación bajo carga lateral de 1 micropilote del grupo de 4 micropilotes

VIII.3 Análisis paramétrico

VIII.3.1 Introducción

El estudio paramétrico es realizado con el fin de entender el comportamiento estático de los micropilotes. Los resultados del estudio paramétrico pueden proporcionar una idea más clara del comportamiento de los micropilotes en aplicaciones de ingeniería. El estudio paramétrico en un micropilote aislado y en un grupo, bajo carga estática vertical y lateral se presenta en la sección a continuación.

VIII.3.2 Micropilote aislado

El estudio paramétrico llevado a cabo con un solo micropilote bajo carga estática se presenta en esta sección. Las variables independientes son el módulo Young del suelo E_s , la variación del mallado del modelo FE, y la intensidad de carga aplicada. El comportamiento estático se estudió a través de las variables dependientes de deflexión.

VIII.3.2.1 Módulo de elasticidad

La variación de la deflexión del micropilote con diferentes módulos de Young del suelo, E_s , bajo una carga de 11 kN a la cabeza del micropilote se presenta en la Figura VIII.17. El gráfico muestra en general que la deflexión aumenta con la disminución de E_s . Además, cuanto menor es el E_s , ocurre una mayor transferencia de esfuerzos hacia la profundidad mayor. En consecuencia, mayor es la profundidad del suelo desde la superficie del terreno que experimenta deflexión. Además, se observa que en el más bajo E_s , es decir, 0.5 MPa, el micropilote no se comportó como una pila larga flexible ya que la desviación de la punta del micropilote no es cero. Precaución adicional se debe tener cuando el micropilote (aproximadamente con 0.15 m de diámetro) está instalado en un suelo con E_s inferior a 1.0 MPa.

VIII.3.2.2 Rigidez relativa E_p/E_s

El análisis numérico lineal y no lineal hecho por Kishishita (2000) muestran que la rigidez relativa E_p/E_s influyo en los desplazamientos horizontales de la estructura superior y la tapa de micropilotes; E_p y E_s son el módulo de Young del pilote y el suelo, respectivamente. El desplazamiento se incrementa cuando la rigidez relativa E_p/E_s aumenta (el suelo se vuelve más blando).

Carga vertical

La Figura VIII.17 muestra la variación en las curvas carga - asentamiento del modelo FE bajo carga vertical en el tope del mp (desplazamiento controlado, $d = 19$ mm) en los distintos módulos de Young E_s del suelo.

Se observa que en los suelos de menor modulo de elasticidad $E_s \leq 10.5$ MPa las curvas muestran una tendencia curva después de producir la falla, a diferencia de los E_s mayores que tienden a una recta, el rango de falla para todo los E_s es al desplazamiento alcanzado entre 4 – 6 mm y a mayor E_s del suelo la capacidad de carga axial aumenta. En el menor modulo la capacidad de carga axial es muy reducida, produciendo una mínima resistencia con lo que la curva tiende a un comportamiento lineal.

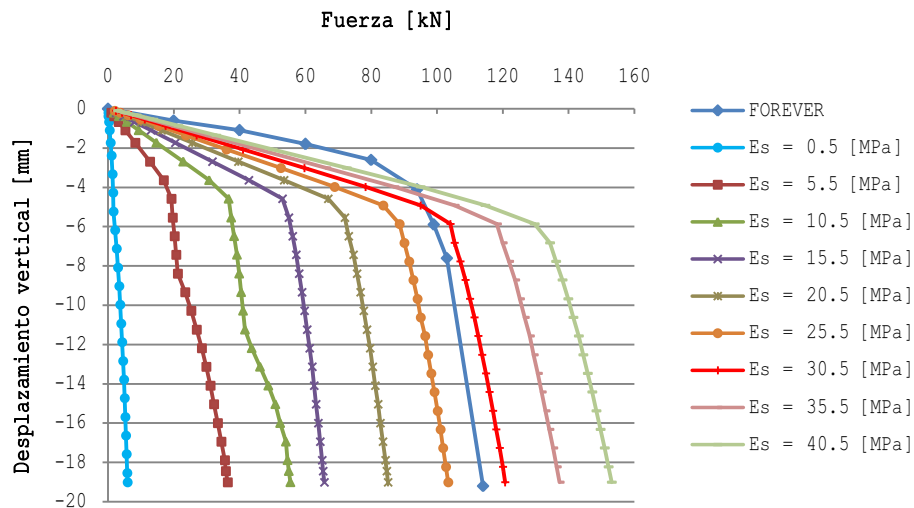


Figura VIII.17 Curva carga - desplazamiento vertical en variación de módulos E_s del suelo

Carga lateral

La Figura VIII.18 presenta las curvas de fuerza resultante - desplazamiento del suelo bajo carga lateral en el tope del micropilote individual. El método utilizado en el análisis entrega un desplazamiento para una fuerza lateral dada $F = 11$ kN, aplicada en la cabeza del micropilote en este caso.

El comportamiento tenso-deformacional resultante para los distintos módulos E_s del suelo varió de tal forma que para los valores menores ($E_s < 5.5$ MPa) las curva resultante presenta una trayectoria adecuada en la respuesta en un suelo, obteniendo desplazamiento de 55% de su diámetro. Luego para los módulos mayores al poseer una mayor rigidez, disminuye el desplazamiento en un orden del 20 al 5 % de su diámetro y aumento la fuerza resultante, dando una curva que tiende a la linealidad de elevada pendiente.

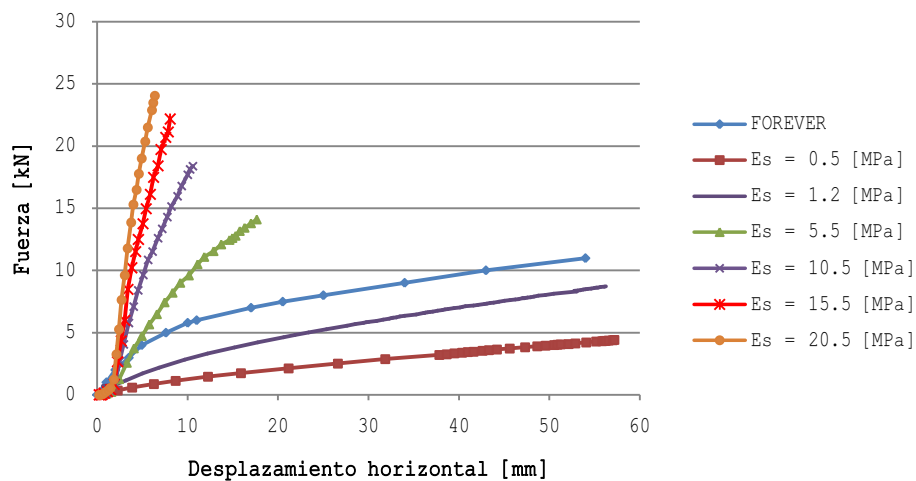


Figura VIII.18 Curva carga - desplazamiento lateral en varios módulos E_s del suelo

La variación de la deflexión en el micropilote a lo largo de él con diferentes módulos de Young del suelo E_s , bajo una carga estática de 11 kN a la cabeza micropilote se presenta en la Figura VIII.19.

El gráfico muestra generalmente que la deflexión aumenta con la disminución de E_s . Además, cuanto menor es el E_s , ocurre que mayor será la transferencia de esfuerzos hacia una profundidad mayor. En consecuencia, mayor la profundidad del suelo desde la superficie que experimenta deflexión. Además, se observa que en el más bajo E_s , es decir, 0.5 MPa, el micropilote no se comporta como un pilote largo y flexible ya que la deflexión de la punta de micropilotes no es cero. Precaución adicional se debe tener cuando un micropilote (aproximadamente con 0.1 m de diámetro) está instalado en un terreno con E_s inferior a 1.2 MPa.

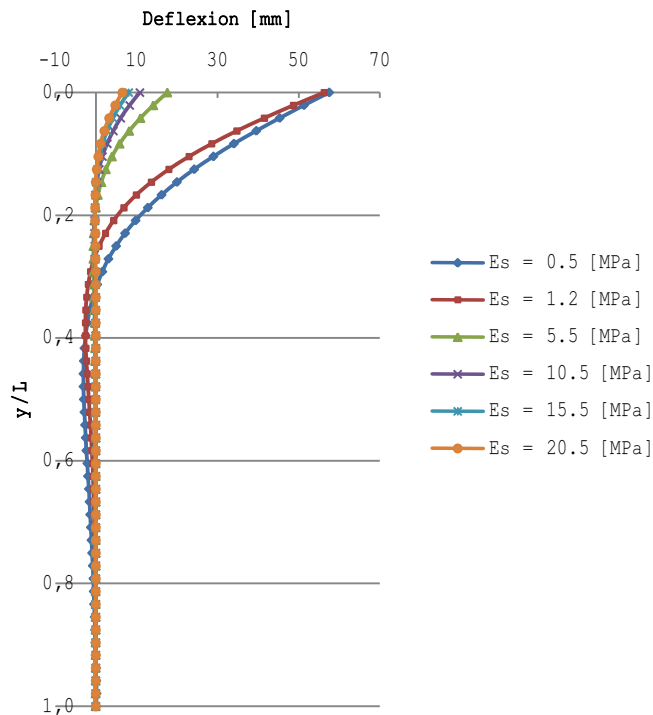


Figura VIII.19 Variación de la deflexión en la profundidad con diferente módulo de Young de los suelos bajo carga de 11 kN a la cabeza del micropilote

VIII.3.1.2 Graduación de grilla

Se realizó la variación de la grilla (mallado) de los modelos en elementos finitos con el fin de analizar el comportamiento del sistema suelo-estructura, la variación de la grilla, significa un cambio en el número de elementos finitos en el modelo y de contactos entre ellos.

El método utilizado fue el dimensionamiento (sizing) en el eje vertical Z de los elementos del modelo FE, con lo que vario el número de contactos en el fuste del micropilote, en específico suelo-lechada.

Carga vertical

La Figura VIII.20 presenta la variación de las curvas fuerza resultante - desplazamiento vertical en los distintos dimensionamiento (sizing) de los ejes del modelo FE, obtenidas tras la aplicación del desplazamiento $d = 19$ mm.

Las curvas presentan rigidez similar (pendiente), sin embargo se observa en las curvas de los modelos con menor dimensionamiento una mayor resistencia a la carga aplicada, esto se debe a que al poseer menor tamaño, los modelos poseen más cantidad de elementos lo que implica a la vez en un número superior de contactos entre el suelo y el fuste del micropilote, por lo tanto mientras más fino el mallado se produce un modelo con más resistencia al desplazamiento de la carga.

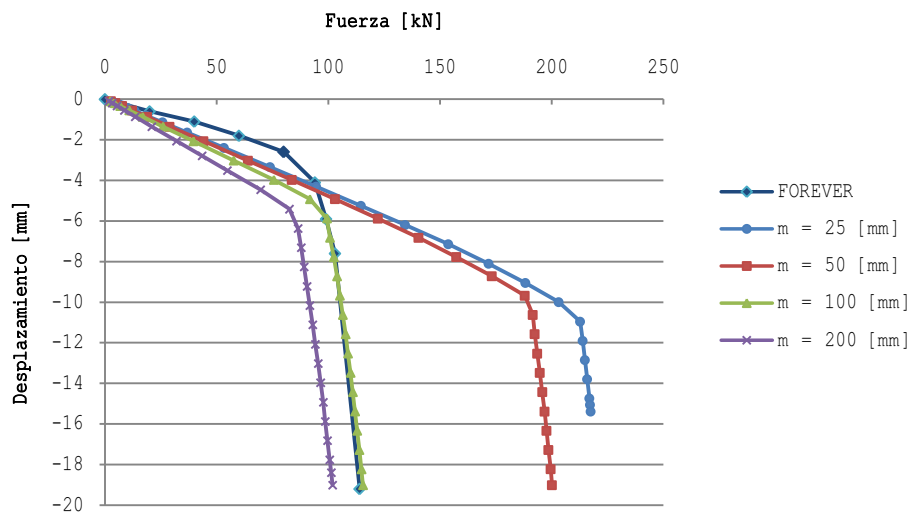


Figura VIII.20 Curva carga – desplazamiento vertical en variación de la grilla, MP aislado

En la Tabla VIII.4 se resume los datos de la modelación para los diferentes mallados, en esta se presenta la variación de elementos según el sizing, la diferencia de tiempo utilizado en la modelación y los datos correspondientes al comportamiento obtenidos de las curvas de los modelos FE.

Tabla VIII.3 Resumen de resultados de los modelos FE en diferente dimensionamiento de la grilla, MP individual

sizing	elemento	nodo	contacto	t	S_{qc}	S_{me}	Q_c	Q_{me}
[mm]	n°	n°	n°	[s]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]
25	74200	344369	2000	21203	11	15	213	217
50	37100	172809	1000	11126	9,7	19	188	200
100	18550	87029	500	4694	6,8	19	99	116
200	9275	44139	250	2801	6,3	19	86	102

Carga lateral

En la Figura VIII.21, se muestran las curvas carga horizontal – desplazamiento horizontal del micropilote para los distintos casos de dimensionamiento de la malla en el eje vertical Z del modelo FE bajo la carga lateral $F = 11$ kN, aplicada en el tope del micropilote.

En este caso los resultados obtenidos de la variación del mallado, no fueron influyentes, ya que no se observa diferencia en el comportamiento de las curvas carga – desplazamiento, exceptuando a que se observa en el inicio de reacción del sistema, que mientras más fino es el mallado, tiende al origen ($m = 40$ mm; $F_r = 0.5$ MPa) a diferencia de las mallas superior que se inicia en fuerzas mayores ($m = 200$ mm; $F_r = 1.5$ MPa). Además el modelo FE con malla de 200 mm solo alcanza el desplazamiento máximo de 47 mm de desplazamiento en 7,6 kN de fuerza resultante a diferencia del resto que alcanzó los 56 mm de desplazamiento en 8,7 kN de fuerza resultante. Esto se debe al poseer un mayor tamaño el elemento, este experimenta un mayor estiramiento produciendo el colapso de este al producirse una extensión excesiva.

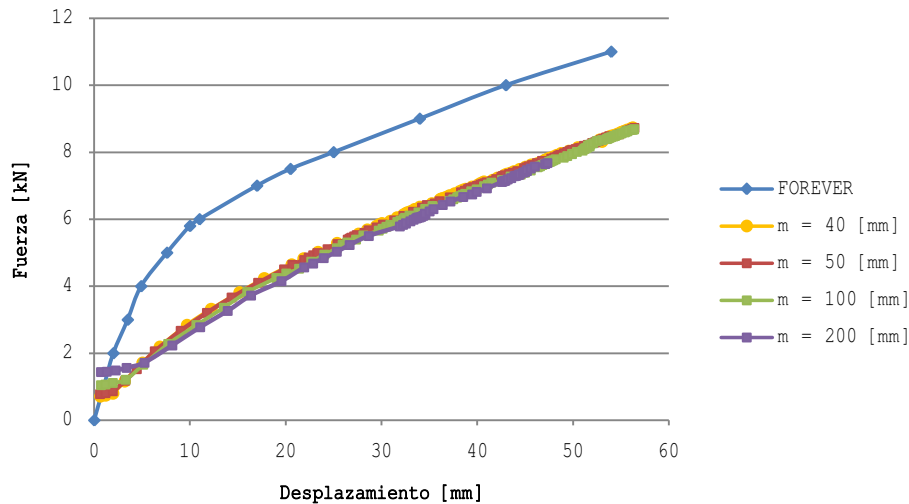


Figura VIII.21 Curva carga lateral – desplazamiento en variación de la grilla, MP aislado

VIII.3.1.3 Intensidad de carga

Carga vertical

La Figura VIII.22, presenta las curvas desplazamiento vertical - fuerza resultante, para los distintos desplazamientos impuestos al modelo FE del MP aislado, estos inician en $d = 10$ mm hasta $d = 40$ mm, con incrementos $\Delta = 10$ mm en cada estado.

La respuesta a los incrementos para cada estado de carga se superpone, no produciendo alguna variación en la trayectoria de las curvas.

Para,

- $d = 10$ mm, se produce fuerza resultante máxima, $F_R = 105$ kN,
- $d = 20$ mm, se produce fuerza resultante máxima, $F_R = 117$ kN,
- $d = 30$ mm, se produce fuerza resultante máxima, $F_R = 125$ kN,
- $d = 40$ mm, se produce fuerza resultante máxima, $F_R = 132$ kN.

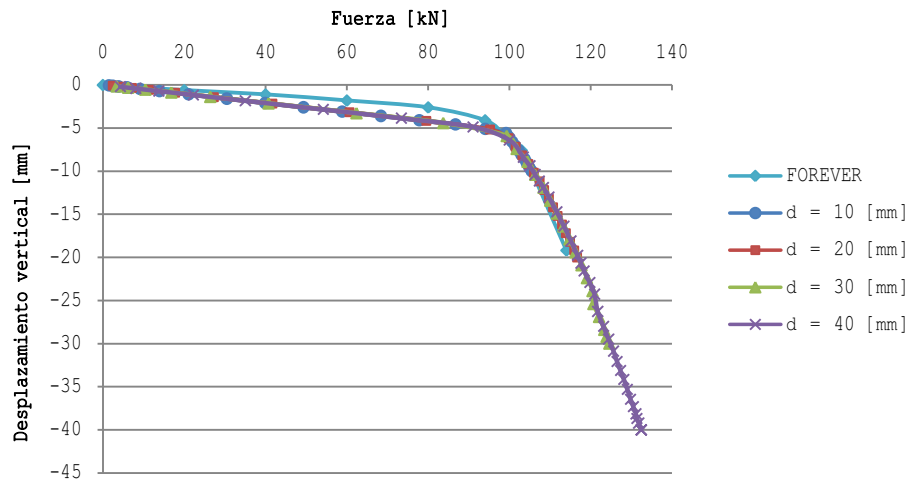


Figura VIII.22 Curva carga - desplazamiento vertical en variación de la carga aplicada

Carga lateral

La Figura VIII.23, presenta las curvas desplazamiento horizontal – fuerza, para los distintos estados de carga lateral impuestos al modelo FE del MP aislado, estos inician en $F = 5.5$ kN hasta $F = 16$ kN, con incrementos $\Delta = 5.5$ kN en cada estado.

La respuesta a los incrementos para cada estado de carga al igual que en el modelo de carga vertical se superpone, no produciendo alguna variación en la trayectoria de las curvas solo se produce en los desplazamientos resultantes.

Para,

- $F = 5.5$ kN, se alcanza un desplazamiento máximo, $d = 27$ mm,
- $F = 11$ kN, se alcanza un desplazamiento máximo, $d = 56$ mm,
- $F = 16$ kN, se alcanza un desplazamiento máximo, $d = 52$ mm.

En el caso de $F = 16$ kN, solo se obtuvo 52 mm de desplazamiento horizontal, esto es debido a que el modelo FE bajo carga lateral falla al seguir incrementando el nivel de carga, solo acepta 8.6 kN.

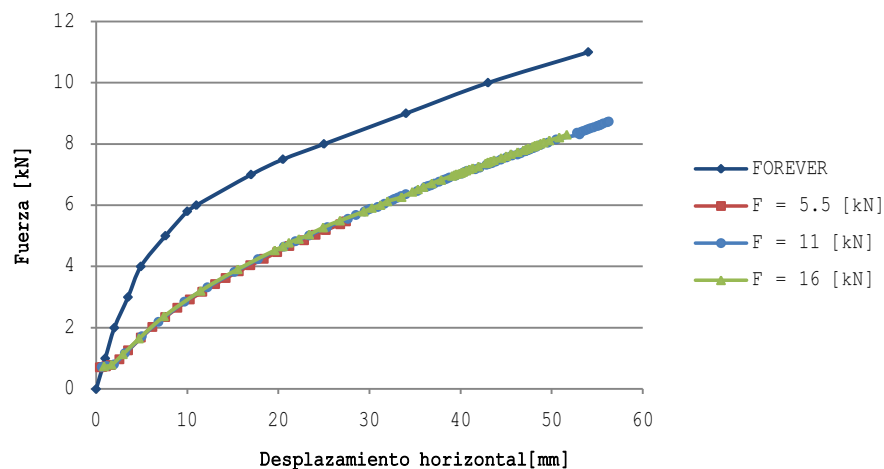


Figura VIII.23 Curva carga – desplazamiento lateral en variación de la carga aplicada

VIII.3.2 Grupo de micropilotes

VIII.3.2.1 Módulo de elasticidad

Carga vertical

La Figura VIII.24 presenta la variación de las curvas fuerza resultante vertical – desplazamiento vertical obtenidas para los distintos módulos E_s , esto bajo carga axial (desplazamiento controlado, $d = 15 \text{ mm}$) aplicado en el tope del micropilote.

Similar al comportamiento a las curvas presentadas en el caso del micropilote aislado (Fig. VIII.17), se observa que a mayor módulo de E_s se genera mayor resistencia al desplazamiento vertical produciendo una curva con un comportamiento bi-lineal, a diferencia en los módulos menores se reduce la resistencia y el comportamiento de las curva tiende a la linealidad.

El máximo corresponde a $E_s = 30.5 \text{ MPa}$, en el cual se obtuvo una fuerza resultante $F_R = 426 \text{ kN}$ al desplazamiento de 15 mm . El mínimo en $E_s = 0.5 \text{ MPa}$ se obtuvo una $F_R = 5.6 \text{ kN}$ a al desplazamiento de 15 mm . El rango de falla se produce entre los $4 - 5 \text{ mm}$ de desplazamiento vertical alcanzado en todos los E_s .

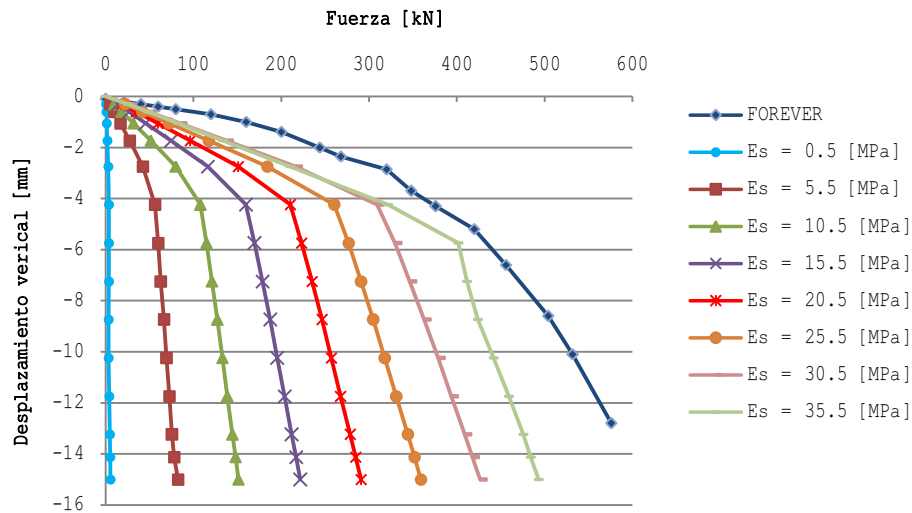


Figura VIII.24 Curva carga - desplazamiento vertical en varios módulos E_s del suelo

Carga lateral

El interfaz del contacto suelo-micropilote, permite espaciamiento (gapping), en donde el micropilote y el suelo se deja separar cuando tensiones normales de tracción existen en su interfaz (con elementos de espaciado).

Se observa en la Figura VIII.25 el detalle del espaciamiento generado tras la aplicación de la carga en el interfaz suelo-micropilote del modelo FE. Se produce la mayor separación en el sector frontal a la carga a diferencia del sector posterior. Lo que indica que los micropilotes frontales reciben una mayor carga que los posteriores.

La Figura VIII.26 presenta las curvas fuerza - desplazamiento horizontal del grupo de micropilotes, bajo carga lateral de 40 kN en el tope del encepado, en los casos donde se varió el módulo de Young del suelo E_s .

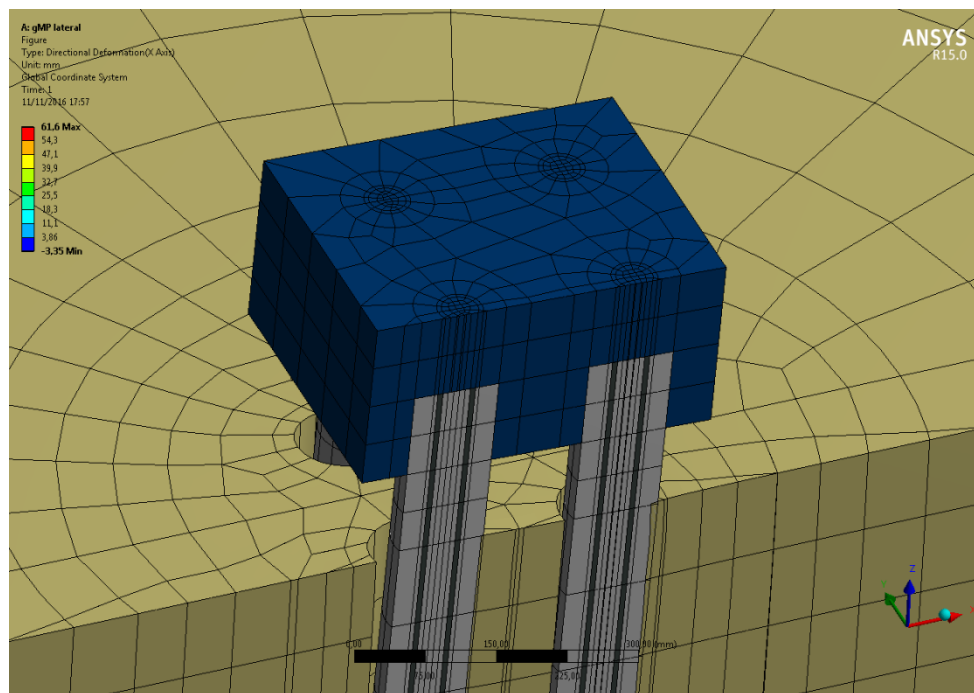


Figura VIII.25 Malla FE del grupo de micropilotes bajo carga lateral con elementos de espaciado en el interfaz

Como se prevé, el desplazamiento debido al cambio de E_s aumenta con la disminución del modulo E_s del suelo en el aumento de la carga, se muestra en la Figura VIII.27. Notar que la relación es lineal entre la carga y el aumento de la deflexión debido a la variación E_s .

Esto implica que los elementos de espaciado no introducen la no linealidad en los sistemas suelo-pilotes. El efecto neto de los elementos de espaciado es reducir las tensiones de tracción en la parte trasera del pilote. Esto resulta en una curva de carga-deflexión lineal, lo que debe otorgar menor rigidez a la cabeza de los micropilotes.

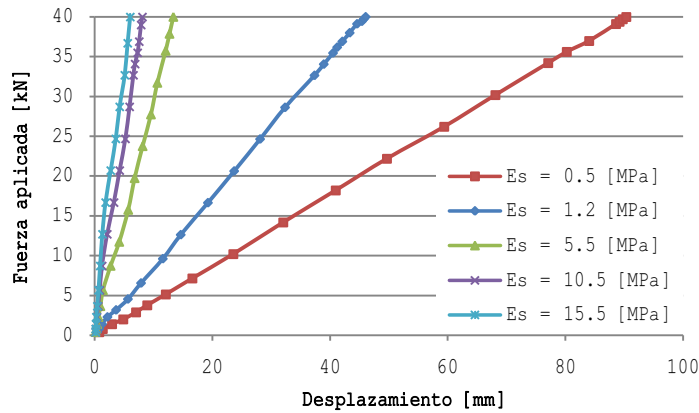


Figura VIII.26 Comparación de deflexiones de la cabeza del micropilote de los modelos FE con gapping en varios módulos E_s del suelo

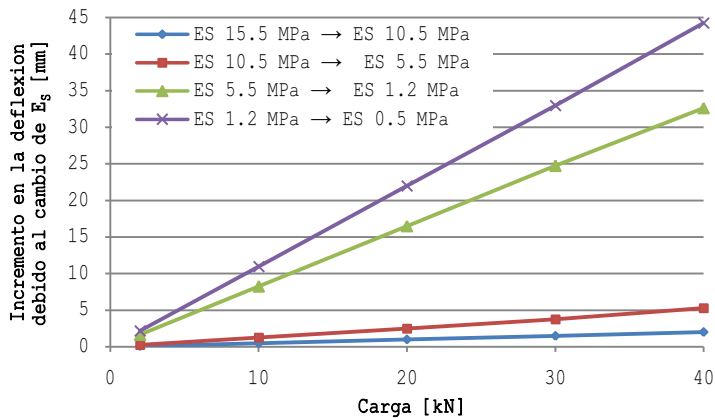


Figura VIII.27 Relación entre el incremento de la deflexión de la cabeza debido al módulo E_s y la carga aplicada en la cabeza del micropilote

La desviación debido a la variación del módulo de elasticidad aumenta en gran magnitud, los porcentaje de aumento en la desviación debido al cambio de E_s , con respecto al modelo con E_s inferior del suelo fueron significativamente elevados. Este fenómeno es ilustrado en la Figura IX.28. Notar que el porcentaje de incremento varía,

- de 69 % a 36%, en el caso de $E_s = 15.5$ MPa a $E_s = 10.5$ MPa;
- de 91 % a 66%, en el caso de $E_s = 10.5$ MPa a $E_s = 5.5$ MPa;
- de 262 % a 238%, en el caso de $E_s = 5.5$ MPa a $E_s = 1.2$ MPa;
- de 99 % a 97.5%, en el caso de $E_s = 1.2$ MPa a $E_s = 0.5$ MPa.

Sin embargo se observa que el porcentaje en la desviación debido al cambio de E_s disminuye con el aumento de carga.

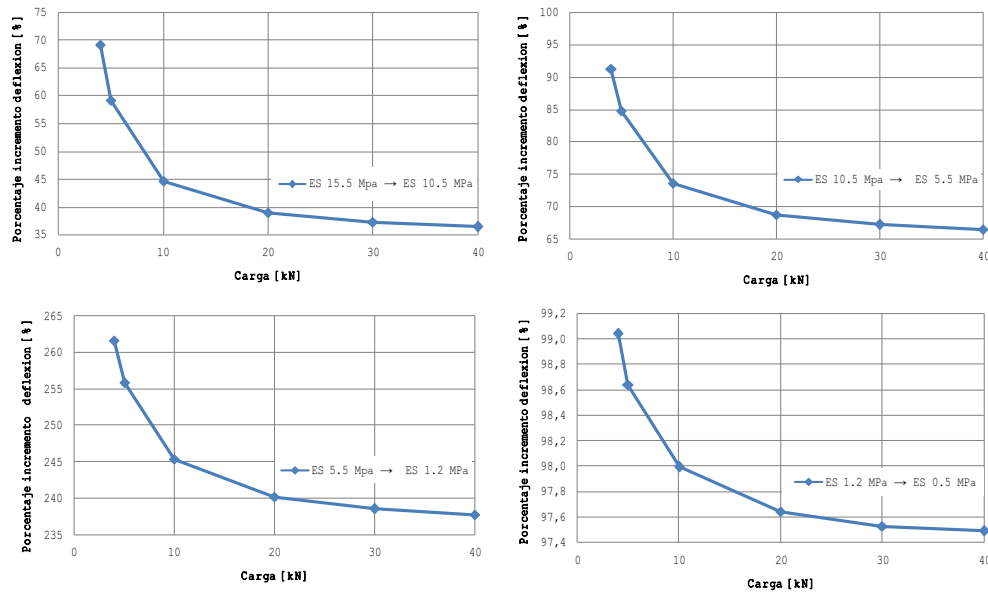


Figura VIII.28 Relación entre el porcentaje de aumento de la deflexión de la cabeza del micropilote debido al cambio de E_s y la carga aplicada en la cabeza del micropilote

La variación de la deflexión a lo largo de la longitud del grupo de micropilotes con módulo de Young variable del suelo E_s , bajo carga estática de 40 kN en el encepado es presentada en la Figura VIII.29. En la Figura y es la profundidad por debajo la superficie del terreno, y L es la longitud de los micropilotes.

En general del gráfico se observa que la deflexión aumentó con la disminución de E_s . Además, cuanto menor es E_s , mayor es la transferencia de esfuerzos hacia una profundidad mayor. Por consiguiente, mayor será la profundidad del suelo desde la superficie que experimenta deflexión. Además, se observa que para un E_s más bajo, es decir, 1.2 MPa, el micropilote no se comporta como un pilote largo y flexible. La deflexión de la punta del micropilote no es cero. Por lo que se debe tener cuidado cuando se instale un micropilote (aproximadamente de 0.1 m de diámetro) en un suelo con E_s inferior a 1.2 MPa.

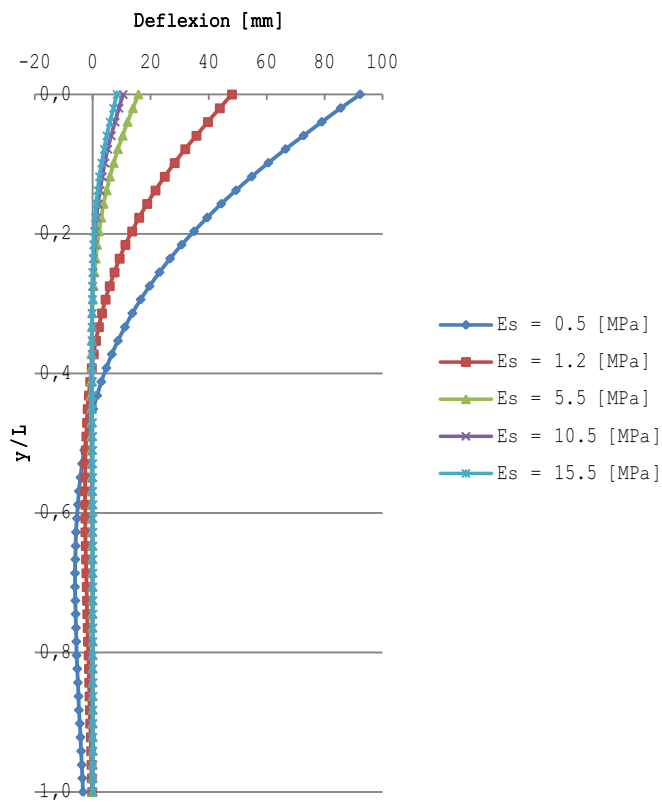


Figura VIII.29 Variación de la deflexión con la profundidad de los suelos con un módulo de Young diferentes con la carga de 40 kN a la cabeza del micropilote

VIII.3.2.2 Graduación de grilla

Carga vertical

La Figura VIII.30 muestra la variación de las curvas carga axial - desplazamiento vertical para los distintos dimensionamiento (sizing) de los ejes del modelo FE, obtenidas tras la aplicación de la carga $d = 15$ mm.

Similar al comportamiento presentado por el modelo FE aislado (Fig. VIII.20), las curvas presentan rigidez similar (pendiente), sin embargo en las curvas de los modelos con menor dimensionamiento poseen una mayor resistencia a la carga aplicada, debido al mayor número de contactos suelo-fuste que se generan al poseer mayor cantidad de elementos.

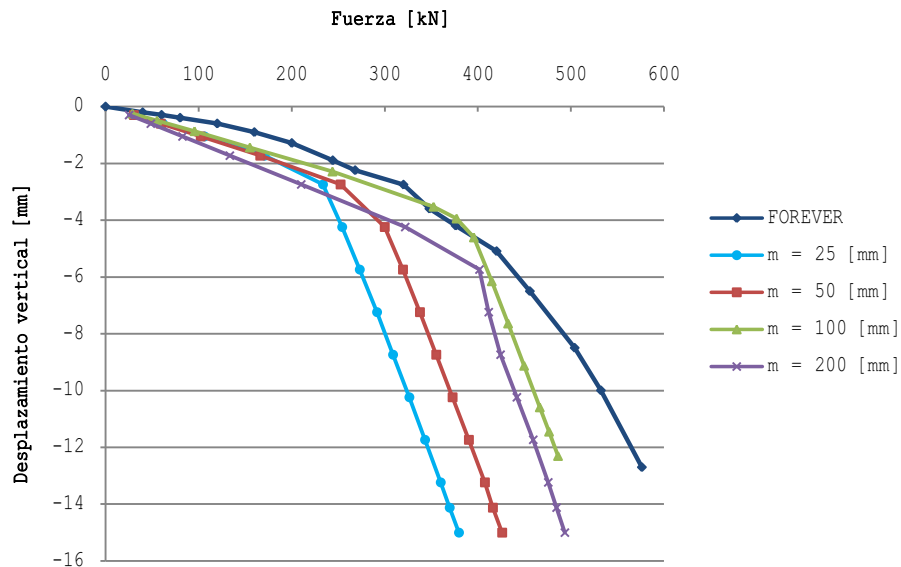


Figura VIII.30 Curva carga – desplazamiento en variación de la grilla, grupo de 4 MP

En la Tabla VIII.5 se resumen los datos de los modelos FE y de su comportamiento, y se presenta en la Figura VIII.31 la diferencia en el tiempo utilizado en la modelación numérica para los distintos mallados.

Tabla VIII.4 Resumen de resultados de los modelos FE en diferentes mallado, grupo MP

sizing	modelo				comportamiento			
	elemento	nodo	contacto	t	S_{qc}	S_{me}	Q_c	Q_{me}
[mm]	n°	n°	n°	[s]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]
25	191484	884484	11256	155183	2,7	15	234	379
0,50	96964	450604	5656	51927	3,5	15	276	426
100	49704	233664	2856	17959	4,6	12,3	396	486
200	26074	125194	1456	2860	5,7	15	402	493

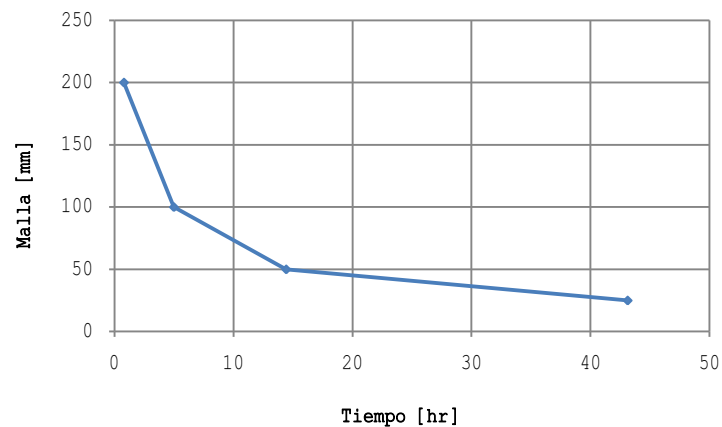


Figura VIII.31 Recurso tiempo utilizado en la modelación en distintos graduacion de malla

Carga lateral

La Figura VIII.32 presenta las curvas fuerza – desplazamiento horizontal para el modelo FE del grupo de cuatro micropilotes, bajo carga lateral $F = 40$ [kN] en el encepado, con variación del dimensionamiento de la grilla en el eje vertical.

No se observó diferencia en la respuesta de los modelos a la variación del mallado, dando por resultado un comportamiento lineal-elástico.

Para,

- malla de 50 mm, se obtuvo 59.4 mm,
- malla de 100 mm, se obtuvo 61.6 mm,
- malla de 200 mm, se obtuvo 64.4 mm.

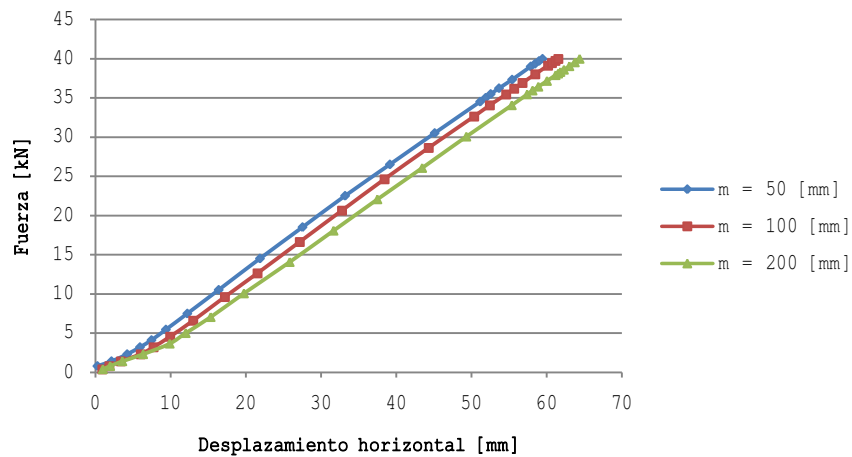


Figura VIII.32 Curva carga – desplazamiento horizontal en variación de la grilla, grupo de 4 MP

VIII.3.2.3 Intensidad de carga

Carga vertical

La Figura VIII.22, presenta las curvas fuerza resultante – desplazamiento vertical, para los distintos desplazamientos impuestos al modelo FE del grupo de cuatro micropilotes, estos inician en $d = 10$ mm hasta $d = 30$ mm, con incrementos $\Delta = 5$ mm en cada estado.

La respuesta a los incrementos para cada estado de carga se superpone al igual que el modelo MP aislado, no produciendo alguna variación en la trayectoria de las curvas. Las fuerzas resultantes para los distintos desplazamientos son las siguientes para,

- $d = 5$ mm, se produce fuerza resultante máxima, $F_R = 366$ kN,
- $d = 10$ mm, se produce fuerza resultante máxima, $F_R = 428$ kN,
- $d = 15$ mm, se produce fuerza resultante máxima, $F_R = 486$ kN,
- $d = 20$ mm, se produce fuerza resultante máxima, $F_R = 542$ kN,
- $d = 25$ mm, se produce fuerza resultante máxima, $F_R = 597$ kN,
- $d = 30$ mm, se produce fuerza resultante máxima, $F_R = 649$ kN.

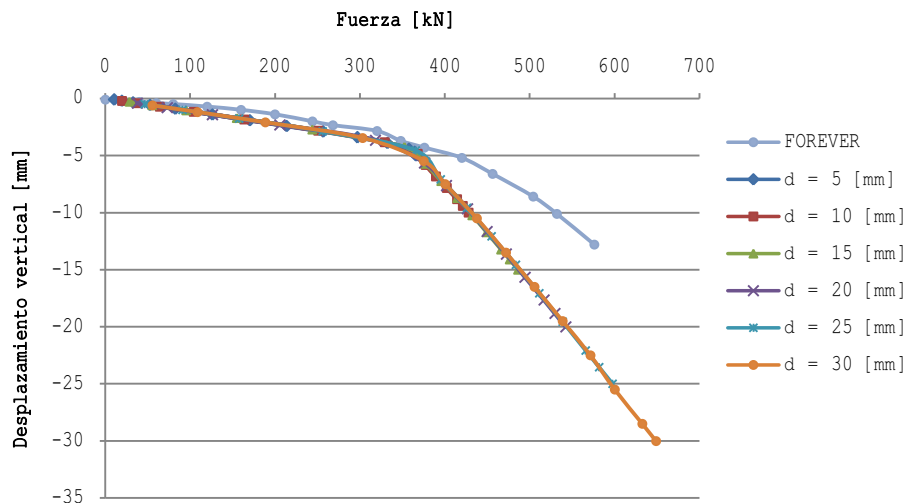


Figura VIII.33 Curva carga – desplazamiento lateral en variación de la carga aplicada, grupo de 4 MP

Capítulo IX

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

X.1 Resumen

Se utilizó modelo FE para estudiar el comportamiento de los micropilotes sometidos a carga estática. Se estudiaron varias configuraciones de uno solo y de un grupo de micropilotes bajo carga estática vertical y lateral. Se implementó el modelo constitutivo de elasto-plasticidad de Drucker-Prager en el código FE de ANSYS para representar el comportamiento estático de los suelos.

La capacidad de la implementación en FE de representar el comportamiento estático del suelo se verificó utilizando el modelo FE para resolver un problema de capacidad de carga de una fundación superficial. La solución de FE se comparó de forma satisfactoria con la solución analítica del problema y bien validado de Terzaghi, junto con la solución FE realizado en ABAQUS.

Este estudio se centró en el análisis de configuraciones específicas del micropilote. Esto es, el estudio de micropilote individual y grupo de cuatro micropilotes sin inclinación. En todos los casos, se impuso una condición de cabeza fija sobre los micropilotes, lo que presenta una conexión rígida entre el micropilote y el encepado.

El método FE es una herramienta para estudiar los efectos de varias variables sobre la respuesta de micropilotes a cargas estáticas. Este capítulo revisa las conclusiones más importantes de este estudio y presenta recomendaciones para estudios posteriores.

X.2 Conclusiones

Las principales conclusiones de este estudio pueden agruparse en tres categorías:

- A. Comportamiento de un único micropilote bajo carga estática,
- B. el comportamiento de un grupo de micropilotes bajo carga estática, y
- C. el comportamiento de ambas configuraciones en un estudio de sensibilidad.

Las conclusiones de este estudio se presentan en detalle en el resto de esta sección. En primer orden la comparativa de los resultados FE con los ensayos a escala real, luego para cada uno de los casos anteriores mencionados, se describe la influencia de diversos parámetros en la respuesta de los sistemas de micropilotes. Estos parámetros incluyen la rigidez del suelo, la intensidad de carga estática y la diferenciación en el mallado de los modelos.

X.2.1 Comportamiento estático de un único micropilote

X.2.1.1 Carga lateral

- La respuesta del sistema del modelo FE con comportamiento no lineal de Drucker-Prager no entregó resultados similares a los entregados por el ensayo a escala real en Saint Rémy, la curva posee menor pendiente en la zona de fluencia del suelo.
- La deflexión resultante representa el comportamiento flexible de los micropilotes, produciendo la transferencia de esfuerzos a una profundidad de $1/3$ de la longitud de estos. Esto es producto de la resistencia en conjunto suelo- micropilote a la carga aplicada.

X.2.1.2 Carga vertical

- El método de elementos finitos con comportamiento no lineal, y parámetros ajustados, demostró ser capaz de representar con gran similitud la respuesta del ensayo a escala real en Saint Rémy de un micropilote bajo carga axial. Sin embargo una curva con comportamiento multilínea en el modelo constitutivo hubiera permitido más precisión en el ajuste de curva.

X.2.2 Comportamiento estático de un grupo de micropilotes

X.2.2.1 Carga lateral

- La respuesta del modelo FE del grupo de micropilotes bajo carga lateral, representa en varios aspectos el comportamiento de un grupo de micropilotes, se produce un alcancé similar en la zona de influencia al del micropilote único. Se percibe una leve rotación en la placa de carga, en la cara posterior a la carga.
- La capacidad de reproducir la curva carga-reacción del sistema no fue la esperada, debido a que representa un comportamiento lineal-elástico a diferencia del obtenido en el modelo FE de micropilote único, sin embargo se obtuvo la fuerza y deformación máxima resultante en el ensayo a escala real en Saint Rémy.
- El modelo constitutivo de Drucker-Prager considero el efecto de sombra. Debido, a que los micropilotes en grupo toman menor carga que el micropilote individual para un mismo desplazamiento. Dentro del grupo, los micropilotes de la primera fila toman mayor carga que los situados la fila posterior.

X.2.2.2 Carga vertical

- La respuesta del método de elementos finitos con comportamiento elasto-plástico de Drucker-Prager entregó resultados similares a los obtenidos en el ensayo de escala real en Saint Remy.
- Al igual que el modelo FE individual la tendencia de la curva carga – desplazamiento presenta un comportamiento bi-lineal, produciendo la fluencia del sistema en el desplazamiento vertical de 6 mm, a diferencia del comportamiento del micropilote bajo carga lateral en donde la fluencia lo gobierna la resistencia del suelo, bajo carga vertical la fluencia es producida por la rotura del enlace suelo-lechada, reflejado en el punto máximo de la gráfica de la Fig. IX.14.
- El coeficiente de eficiencia obtenido en los modelos de elementos finitos del grupo de micropilotes son levemente inferiores a los obtenidos en los ensayos a escala real en Saint Rémy, esto es producto a que no se implemento un método de inyección de la lechada a diferencia del caso real, el cual produce una densificación del suelo interior al grupo de micropilotes.

X.2.3 Comportamiento a la variación de parámetros

- La deflexión aumenta con la disminución del módulo de Young del suelo, E_s . Basándose en uno de los estudios numéricos, el suelo con E_s menor que $1,0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, la deflexión en la punta del micropilote no era cero. Esto implica que el micropilote se comporta como un pilote rígido y no como un pilote largo y flexible, como se supone comúnmente para el diseño de micropilotes. Cuanto más alto sea la rigidez del suelo, menor será la longitud del micropilote (medida desde la cabeza del micropilote) que moviliza la resistencia.
- La resistencia lateral del suelo a la carga, aumento de manera considerable junto con el incremento E_s del suelo, produciendo una disminución considerable en la deformada de la estructura y de los desplazamientos del suelo lateral.
- La variación del módulo de Young del suelo, E_s en el comportamiento bajo carga vertical se observa una tendencia tanto en el análisis del micropilote único y del grupo al incremento en el asentamiento para E_s elevados, de la misma manera que la capacidad de carga de estos.
- La variación del mallado en el eje vertical Z de los modelos FE, produjo un incremento en la resistencia del sistema bajo carga vertical, esto es debido al incremento en el número de contactos al poseer mayor cantidad de elementos lo que produce un enlace suelo-lechada con mayor adherencia.
- La variación del mallado en los modelos FE bajo carga lateral no se produce cambio en el comportamiento de las curva carga-desplazamiento, esto es debido a que el número de elementos finitos en el eje horizontal X de los modelos FE se mantuvieron constantes, por lo que no varía la cantidad de elementos por donde se distribuyen los esfuerzos generados tras la aplicación de la carga. Lo que hubiera permitido visualizar algún tipo de cambio en el comportamiento.
- La variación de la intensidad de carga en los modelos FE para ambas configuraciones (individual y grupo) bajo carga vertical y lateral, no produjo cambios en el comportamiento ni en la tendencia de las curvas carga-desplazamiento, solo se produce incremento o disminución en la deformación a los distintos estados de carga, esto es debido a que al ser solicitudes estáticas aplicada de forma puntual en el mismo lugar no producirá otro tipo cambio. Por lo que es necesario realizar análisis de distintas tipos de solicitudes de carga y el lugar donde se aplicaran, con fin de poder obtener variabilidad en el comportamiento de los modelos.

X.2.4 Utilización del modelo constitutivo de D-P

- Los resultados obtenidos de la modelación numérica de los ensayos a escala real de micropilotes en Saint Rémy bajo carga vertical y lateral, se asemejan de manera considerable, en mayor forma en los modelos bajo carga vertical, por lo que la interacción entre el enlace suelo-lechada quedó bien representado en la simulación. Sin embargo el comportamiento bajo carga lateral no es del todo correcto, ya que la tendencia de curvas tensión-deformación resultantes no se asemejan a las obtenidas en los ensayos a escala real. Se puede concluir que al ser distintos tipos de ensayos y que los gobiernen distintos tipos de comportamientos, el sistema suelo-micropilote deba ser configurado con distintos parámetros de entrada, buscando simular de forma más óptima la resistencia lateral del suelo-micropilote en el caso de solicitud horizontal y la resistencia del enlace suelo-lechada en el caso de solicitud axial.
- El uso del modelo constitutivo de Drucker-Prager en la representación del comportamiento del suelo, en parte se debe a su simplicidad; a un número reducido de variables necesarias para su implementación; a la capacidad de acoplar distintos tipos de comportamientos de los estados del suelo, haciéndolo que sea versátil y a que estas variables se obtienen de ensayos standard de los laboratorios de mecánica de suelos sin mayores requerimientos. Estos fundamentos hacen que sea incluido en gran parte de los programas de elementos finitos, tanto de propósito general como especializados en el área de suelos.

X.3 Recomendaciones de futuras líneas de investigación

La utilización de modelos numéricos, en el caso particular del estudio realizado con el Método de Elementos Finitos, otorga el beneficio de realizar un desarrollo progresivo del problema planteado, con la finalidad de complementar y perfeccionar lo realizado. Es en este marco que se nombran algunas recomendaciones para el continuo desarrollo de esta investigación con la utilización de Software ANSYS.

- El conocimiento específico del modelo constitutivo a utilizar junto a una correcta ejecución de los ensayos y procedimientos de laboratorio para la obtención de los parámetros utilizados en este. Es esencial para la obtención de resultados congruentes con lo que se desea duplicar. La falta de conocimiento del modelo o rigurosidad en los ensayos inducirá a errar en los datos de entrada, dificultando la convergencia de los modelos y excesivo uso de recurso computacional y de tiempo.
- El análisis dinámico de los modelos FE a través de la aplicación de cargas sísmicas, proporcionara el comportamiento sísmico de la interacción suelo-micropilote, se puede realizar a través de la herramienta de Análisis Transiente de ANSYS.
- La variación de parámetros de relevancia, en diseño y capacidad de soporte del micropilote. Proporciona noción de la medida en que estos deben ser considerados en los respectivos diseños.
 - a. Micropilote: espaciamiento e inclinación, rigidez de los materiales constituyentes, número y configuración de estos.
 - b. Suelo: variación en la densidad del suelo y la no homogeneidad del suelo con la incorporación de distintos estratos.
- La obtención y análisis de los esfuerzos internos en el micropilote generados tras la aplicación de las distintas solicitudes externas: momento flector, esfuerzo cortante, deflexión y rotación.
- La implementación del modelo constitutivo de Mohr-Coulomb, presente desde la versión 17 de ANSYS, dará un punto de comparación a los resultados obtenidos con el modelo actual de Drucker-Prager y que diferencias existen entre los dos modelos constitutivos utilizados.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

ANSYS Inc. (2013). Release 15.0, Documentation for ANSYS.

Amar, S. (1993). "Les micropieux". Rapport interne. Laboratoire Central des Pont et Chaussées, 22 p.

Bustamante, M. (1980). "Capacité d'ancrage et comportement des tirants injectés, scellés dans une argile plastique". Thèse Docteur-Ingénieur ENPC, Paris.

Bustamante, M. y Doix, B. (1985). "Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés". Bulletin de liaison des Lab. des Ponts et Chaussées. N°: 140. pp. 75-92.

Bruce, D.A., Pearlman, S.L. y Clark, J.H. (1990). "Foundation rehabilitation of the Pocomoke River Bridge, MD, using high capacity preloaded pinpiles". Paper IBC-90-42, 9 p.

Bruce, D.A. (1992). "Small diameter cast in place elements for load bearing and in-situ earth reinforcement". Report, Nicholson Construction of America, P.O. BOX 308, Bridgeville, PA 15017, 84 p.

Bruce, D.A., DiMillio, A.F. y Juran, I. (1995). "Introduction to Micropiles: An International Perspective". In Foundation Upgrading for Infrastructure Improvement. American Society of Civil Engineers, Proceedings of the ASCE Convention, San Diego, CA, Oct. 23-36, Geotechnical Speciality Publication n°. 50, pp. 1-26.

Bruce, D.A. (1996). "Micropiles for Structural Support and In Situ Reinforcement". Presented at the 1996 Oregon Section Geotechnical Seminar, Portland, OR, November 6, 26 p.

Bruce, D.A., DiMillio, A.F. y Juran, I. (1997). "Micropiles: The State of Practice Part I: Characteristics, Definitions, and Classifications". Ground Improvement. Thomas Telford, Vol. 1, No. 1, January, pp. 25-35.

Documento D.S.I. (1994). "GEWI-Pile: The ideal foundation element". Dywidag-System International.

DIN 488 (2009). "Reinforcing steels - Reinforcing steel bars". 2009-08.

DIN 4125 (1990). "Ground anchorages - Design, construction and testing". 1990-11.

DIN 4128 (1983). "Small diameter injection piles; Construction procedure, design and permissible loading". 1983-04.

DIN V 1054 - 100 (1996). "Soil - Verification of the safety of earthworks and foundations - Part 100: Analysis in accordance with the partial safety factor concept". 1996-04.

DIN 17124 (1986). "Seamless circular fine grain steel tubes for structural steelwork technical delivery conditions". 1986-05.

Documento D.S.I. (2013). "GEWI-Pile". Dywidag-System International, Approval Number: Z-32.1-9 y Z-32.1-2.

Documento Ischebeck (1999). "Micropilotes - Anclajes Titan".

Documento Ischebeck (2008). "Micropilotes, Anclajes y Bulones autoperforantes Titan".

Documento Terratest (2006). "Proyecto: Enlaces 5,6 y 7 Puente Llacolen Sobre el Bio Bio". Pilotes Terratest. FT-98245-01-rev.3, FT-98100-01-rev.3.

D.T.U. (1987). (Unified Technical Document). No.13.2 "Deep foundation work for buildings". Amending supplement No. 2 to the specifications of DTU 13.2 of June 1987.

D.T.U. 13.2 (1978)/ Additif (1991). "Travaux de fondations profondes pour le bâtiment". Additif. Modification N°2 au cahier de charges du DTU 13.2 de Juin 1978. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Paris.

Eurocode 7-1 (2001). Geotechnical design - Part 1: "General rules". Final draft EN 1997-1, October, Doc. n° CEN/TC 250/SC7N355, Comité Européen de Normalisation (CEN), Bruxelles.

Fascículo 62-Título V (1993). Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil. Centre des techniques d'ouvrage d'art, Cahier de clauses techniques générales applicable aux marchés publics de travaux. Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports.

FHWA, (2000). "Micropile Design and Construction Guidelines". US Department of Transportation. Implementation Manual. Publication No. FHWA-SA-97-070. June 2000.

-
- Frank, R. (1999).** "Calcul des fondations superficielles et profondes". Techniques de l'ingénieur et Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Fleming, W.G.K., Weltman, A.J., Randolph, M.F., y Elson, W.K. (1985).** "Piling Engineering". First Edition. Surrey University Press. Glasgow. 380 p. (Third Edition 2009).
- FOREVER (2008).** "Synthesis of the Results and Recommendations of the French National Project on Micropiles". ADSC.
- Garcia, I. (2008).** "Análisis numérico de pilotes en arenas sometidas a cargas laterales". Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Gouvenot, D. (1973).** "Essais en France et à l'étranger sur le frottement latéral en fondation: amélioration par injection". Travaux, N° 464, Paris.
- Lizzi, F. (1952).** "First Patents on Root Piles and Reticulated Root Piles".
- Helwany, S. (2007).** "Applied Soil Mechanics with ABAQUS Applications". John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-0-471-79107-2.
- Lizzi, F. (1978).** "Reticulated root piles to correct landslides". ASCE Convention, Chicago, Illinois. Preprint 3370, 25 p.
- Lizzi, F. (1982).** "Static Restoration of Monuments". Sagep Publisher. Genoa, Italy. 146 p.
- Lizzi, F. (1985).** "Pali radice structures". Underpinning. Cap. 4. Ed. Thorburn S. y Hutchinson J.F. Surrey University Press. Glasgow and London. pp. 84-151.
- Muir, D. (2004).** "Geotechnical Modelling". Version 2.2, Abril 2004.
- Norme P11-212-1 (DTU 13.2).** Foundations profondes pour le bâtiment, septembre 1992.
- Palmerton, J.B. (1984).** "Stabilization of moving land masses by cast-in place piles". Geotech Lab, USACOE, WES, Vicksburg, Mississippi. Final Report GL-84-4 134 p.
- Pello T., Plumelle, C. et Raynaud, D. (1995).** "Expérimentation en vraie grandeur de groupes de micropieux. Réalisation des micropieux". Rapport interne n° FO/94/05.
- Plumelle, C., Pello, T., et Raynaud. (1995).** "Expérimentation en vraie grandeur de groupes de micropieux. Construction du site d'essais". Rapport interne n° FO/94/01.
- Plumelle, C. et Reynaud, D. (1996).** "Essais de chargement des micropieux isolés et des groupes". Rapport interne n° FO/95/03.

Plumelle C., Frank R., Canou J., Estephan R., Gangneux P., Foray P. y Garnier J. (2001). "Differentes approches du comportement des groupes et des réseaux de micropieux, en modèle réduit, en modèle centrifugé et en vraie grandeur". Comptes rendus 15è Cong. Int. Méca Sols et Géotechnique, Istanbul, 23-31 aout 2001, vol3, pp. 1827-1833.

Plumelle C., Frank R., Canou J., Estephan R., Gangneux P., Foray P. y Garnier J. (2001). "Differentes approches du comportement des groupes et des réseaux de micropieux, en modèle réduit, en modèle centrifugé et en vraie grandeur". Comptes rendus 15è Cong. Int. Méca Sols et Géotechnique, Istanbul, 23-31 aout 2001, vol3, pp. 1827-1833.

Potts, M. y Zdravkovic, L. (1999). "Finite element analysis in geotechnical engineering, Theory". Thomas Telford.

Poulos, H. G. y Davis, E. H. (1980). "Pile foundation analysis and design". New York: Jhon Wiley & Sons.

Schlosser, F. y Guilloux, A. (1981). "Le frottement dans le renforcement des sols". Revue française de géotechnique, n° 16, aout, pp.65-77.

TA 85 (1985). "Nouveautés en matière de tirants d'ancrage". 3e édition des recommandations du Bureau Securitas, Bustamante M. y Logeais L., TA 85, Conférence ITBTP, Paris, 23 avril 1985.

TA 86 (1986). "Recommandations concernant la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des tirants d'ancrage". Bureau Securitas, Eyrolles 1986.

Vezole, P. (2002). "Ancrages passifs verticaux et calcul a la rupture". Revue Française de géotechnique, n° 98, pp. 47 - 62.