



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**TESIS DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

TEMA:

**“IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO DE CIMENTACIONES CON
MICROPILOTES EN EL LABORATORIO VIRTUAL DE
INGENIERÍA GEOTÉCNICA (LVIG)”**

DATOS GENERALES

AUTOR:

Alvaro Alberto Palacios Andrade

DIRECTOR:

Ing. José C. Hurtado Hurtado

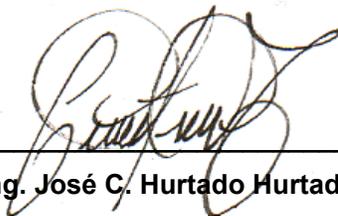


Ing. José C. Hurtado Hurtado

DIRECTOR DE TESIS

CERTIFICA:

Haber dirigido y revisado la tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Civil, realizada por el Profesional en formación: Alvaro Alberto Palacios Andrade, cuyo título es: “IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO DE CIMENTACIONES CON MICROPILOTES EN EL LABORATORIO VIRTUAL DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA (LVIG)”; tema que cumple con las características exigidas por la reglamentación de la Escuela de Ingeniería Civil, por tanto, autorizo su presentación.



Ing. José C. Hurtado Hurtado



AUTORÍA

El contenido en general; conceptos, análisis, criterios, y desarrollo del programa es de exclusiva responsabilidad del autor.



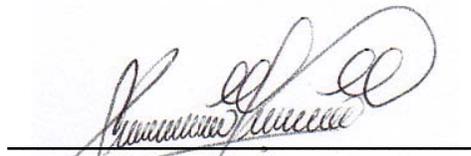
Alvaro Alberto Palacios Andrade



CESIÓN DE DERECHOS

Yo, *Alvaro Alberto Palacios Andrade*, declaro ser autor del presente trabajo y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la universidad”.



Alvaro Alberto Palacios Andrade



AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica Particular de Loja, y a sus docentes, quienes me han brindado todo su apoyo en el transcurso de mis estudios.

Al Ingeniero José C. Hurtado Hurtado, Director de Tesis, por guiarme en la elaboración de este proyecto y por su colaboración científica y técnica para la culminación del presente.

En especial a mis padres que han sido la principal guía en mi desarrollo profesional y siempre me apoyaron en mi vida personal, mis hermanos por brindarme su cariño y estímulo para seguir adelante.

A mis compañeros y leales amigos por su apoyo incondicional en toda esta etapa de aprendizaje.

MUCHAS GRACIAS

El Autor



DEDICATORIA

A Dios, fuente de luz e inspiración.

A mis padres Franz Palacios y Rosa Andrade, por todo el apoyo y confianza depositada durante toda esta etapa de preparación; a mis hermanos Luis, María y Andrea motivo de superación y los principales autores en mi formación académica, profesional y personal.

A mis familiares y amigos que siempre me han ofrecido su apoyo y cariño.

Alvaro Alberto Palacios Andrade



CONTENIDO

	Pág.
CERTIFICACIÓN	I
AUTORÍA	II
CESIÓN DE DERECHOS	III
AGRADECIMIENTO	IV
DEDICATORIA	V
CAPITULO I	
1 GENERALIDADES	2
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3 SOLUCIÓN.....	2
1.4 OBJETIVOS	3
CAPITULO II	
2 CONCEPTOS Y PRINCIPIOS BÁSICOS EN EL DISEÑO DE MICROPILOTES	5
2.1 MICROPILOTES	5
2.1.1 DEFINICIÓN.....	5
2.1.2 COMPORTAMIENTO DEL MICROPILOTE EN ROCA.	6
2.1.3 COMPORTAMIENTO DEL MICROPILOTE EN SUELOS GRANULARES.	6
2.1.4 COMPORTAMIENTO DEL MICROPILOTE EN SUELOS COHESIVOS.	7
2.2 CLASIFICACIÓN	7
2.2.1 SEGÚN LA FORMA DE TRANSMISIÓN DE LOS ESFUERZOS AL TERRENO.	7
2.2.2 SEGÚN EL TIPO DE SOLICITACIÓN DOMINANTE.	7
2.2.3 SEGÚN EL SISTEMA DE INYECCIÓN DEL MORTERO DE CEMENTO.	7
2.3 APLICACIONES DE LOS MICROPILOTES.....	9
2.3.1 COMO CIMENTACIÓN O RECALCE DE ESTRUCTURAS.	9
2.3.2 CONSTITUYENDO CORTINAS O MUROS DISCONTINUOS.	9
2.3.3 TRABAJANDO A FLEXIÓN Y TRACCIÓN.....	10
2.3.4 EN PARAGUAS DE SOSTENIMIENTO.	10
2.3.5 PARA MEJORA DEL TERRENO.	11
2.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MICROPILOTES	12



2.5 PRUEBAS DE CARGA	13
----------------------------	----

CAPITULO III

3 ANÁLISIS Y DISEÑO DE MICROPILOTES.....	16
3.1 COMPROBACIÓN FRENTE AL HUNDIMIENTO	16
3.1.1 RESISTENCIA DE CÁLCULO POR FUSTE.	18
3.1.1.1 MÉTODO TEÓRICO.	18
3.1.1.2 CORRELACIONES EMPÍRICAS.	20
3.1.2 RESISTENCIA POR PUNTA.	22
3.1.2.1 RESISTENCIA POR PUNTA EN SUELOS.	22
3.1.2.2 RESISTENCIA CONSIDERANDO EL EMPOTRAMIENTO EN ROCA.....	22
3.1.3 OTROS MÉTODOS DE CÁLCULO.....	23
3.1.3.1 MÉTODO TRADICIONAL PARA “PALI RADICE O MICROPILOTES”	23
3.1.3.2 MÉTODOS CONVENCIONALES.....	24
3.2 COMPROBACIÓN FRENTE AL ARRANQUE	26
3.2.1 RESISTENCIA FRENTE AL ARRANQUE.....	26
3.3 FALLO ESTRUCTURAL DE LOS MICROPILOTES.....	27
3.3.1 RESISTENCIA ESTRUCTURAL A COMPRESIÓN.....	27
3.3.2 RESISTENCIA ESTRUCTURAL A TRACCIÓN.	32
3.3.3 TOPE ESTRUCTURAL.	33
3.3.4 RESISTENCIA ESTRUCTURAL A FLEXIÓN Y CORTANTE.	34
3.4 ASENTAMIENTO DE LOS MICROPILOTES.....	37
3.4.1 CONSIDERACIONES GENERALES.	37
3.4.2 MICROPILOTES EN SUELOS GRANULARES.....	38
3.4.3 MICROPILOTES EN SUELOS COHESIVOS.	38
3.5 ANÁLISIS Y DISEÑO DE MICROPILOTES EN GRUPO	39
3.5.1 GRUPO DE MICROPILOTES.....	39
3.5.1.1 EFICIENCIA DE GRUPO.....	40
3.5.1.2 COMPROBACIÓN FRENTE AL HUNDIMIENTO.	41
3.5.1.3 ASENTAMIENTO EN GRUPO DE MICROPILOTES.....	42
3.6 COMPROBACIÓN FRENTE A SOLICITACIONES TRANSVERSALES.	45
3.6.1 MÉTODO DE BROMS.....	45
3.6.2 MÉTODO DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ	50
3.6.3 MÉTODO DE ANÁLISIS MEDIANTE CURVAS P-Y.....	53



3.7 SISTEMA DE EJECUCIÓN	62
3.7.1 PERFORACIÓN DEL TERRENO.	62
3.7.2 LIMPIEZA DE LA PERFORACIÓN.	62
3.7.3 COLOCACIÓN DE LA ARMADURA.....	62
3.7.4 INCORPORACIÓN DEL MORTERO.	63
3.7.5 RETIRO DEL ENTUBADO.....	63
3.7.6 COLOCACIÓN DEL ENCEPADO EN CABEZA.	63
CAPITULO IV	
4 DESARROLLO DE LA APLICACIÓN DEL DISEÑO DE MICROPILOTES PARA EL LABORATORIO VIRTUAL DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA	66
4.1 COMPROBACIÓN FRENTE AL HUNDIMIENTO	66
4.2 RESISTENCIA ESTRUCTURAL DEL MICROPILETE A COMPRESIÓN Y TRACCIÓN	75
4.3 RESISTENCIA ESTRUCTURAL A FLEXIÓN Y CORTANTE	80
4.4 CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS EN MICROPILOTES.....	84
4.5 CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS EN GRUPO DE MICROPILOTES	86
4.6 CARGA LATERAL	91
CAPITULO V	
5 EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS Y DISEÑO	96
5.1 EJEMPLOS DE DISEÑO	96
5.2 ANÁLISIS PARAMÉTRICO	105
CAPITULO VI	
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	111
CAPITULO VII	
7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113

CAPITULO I



1 GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El micropilotaje es una técnica que se encuentra en su punto más alto de investigación, pues es capaz de resolver multitud de problemas geotécnicos de hoy en día (*Antonio Ros Esteban*)¹. Su principal virtud es la versatilidad, debida a las pequeñas dimensiones de los equipos y a los rendimientos que pueden obtenerse y siendo así, con esta ventaja sus aplicaciones son múltiples.

Como estos elementos poseen una gran diferencia entre su longitud y diámetro, las cargas y esfuerzos no son soportados particularmente por el elemento en sí, sino también el suelo que se encuentra a su alrededor (resistencia por fricción suelo - micropilote) ayuda a resistir los efectos producidos por la estructura, y ya que por esta razón no reciben carga directa, forman una infraestructura interna dándole coherencia a la masa de suelo (*Manuel Romana Ruiz*)².

Los micropilotes se pueden construir en cualquier tipo de suelo, especialmente cuando se pretenda cimentar una obra existente (recalces), y que necesite de un procedimiento poco destructivo para evitar daños en aquella estructura y edificaciones adjuntas o aledañas a esta si las hubiere, o cuando no es factible la ejecución de pilotaje convencional ya sea por la naturaleza del terreno o por dificultad en accesos y maniobrabilidad.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Hoy en día existen diversas herramientas útiles para realizar diseños y estudios relacionados con las cimentaciones utilizando micropilotes, mejorando la calidad tanto de enseñanza como de aprendizaje, y que a más de ello ayuda a disminuir en gran medida el tiempo cuando se realiza un cálculo con métodos convencionales.

En la UCG (Unidad Civil y Geóloga) de la Universidad Técnica Particular de Loja, se está llevando a cabo la implementación de un laboratorio virtual de Ingeniería Geotécnica (LVIG), el cual al momento no posee una herramienta sobre el diseño de micropilotes; siendo esta un instrumento muy importante en la enseñanza-aprendizaje de estudiantes y profesionales a nivel de pregrado y postgrado.

1.3 SOLUCIÓN

Como solución al problema antes planteado se pretende implementar un experimento virtual para el diseño de cimentaciones con micropilotes en el laboratorio virtual de Ingeniería Geotécnica mediante la utilización del software Visual Basic.NET.



1.4 OBJETIVOS

- GENERAL

Desarrollar una aplicación para el diseño de cimentaciones con micropilotes en Visual Basic.NET y su respectiva implementación en la plataforma del Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica.

- ESPECÍFICOS

- Mejoramiento de la calidad de enseñanza y aprendizaje de la Ingeniería de Cimentaciones y Geotécnica.
- Diseñar cimentaciones con micropilotes en uno, dos tres y cuatro diferentes tipos de estratos.
- Diseñar cimentaciones con micropilotes considerando el efecto del nivel freático.
- Obtener una aplicación de diseño que facilite el estudio de cimentaciones con micropilotes.
- Incentivar a los estudiantes de la Universidad Técnica Particular de Loja a que sean partícipes del nuevo Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica.

CAPITULO II

2 CONCEPTOS Y PRINCIPIOS BÁSICOS EN EL DISEÑO DE MICROPILOTES

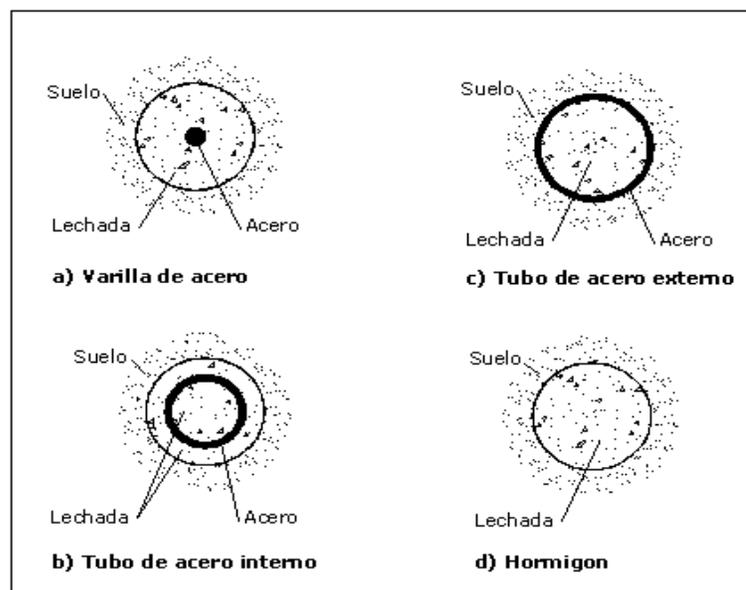
2.1 MICROPILOTES

2.1.1 Definición

Los **micropilotes**, también llamados **pilotes de raíz** o **minipilotes**, son elementos estructurales similares a los pilotes, de forma tubular y con una longitud mucho mayor a su diámetro aunque de menor capacidad portante, diseñados especialmente cuando se pretenden efectuar cimentaciones profundas y cuando los estratos superficiales del terreno no poseen la capacidad portante necesaria para la absorción de las cargas transmitidas por la estructura, y preparados especialmente para resistir esfuerzos de tracción y compresión (MFOM)³.

Está compuesto solamente por mortero en casos donde no se necesite mayores resistencias, o en la mayoría de los casos por un tubo o varilla de acero colocado en el interior de un taladro que perforará el terreno al cual se le incorpora lechada de cemento mediante inyección (Fig. 2.1).

Figura. 2.1. SECCIONES TÍPICAS DE MICROPILOTES



Fuente: Manuel Romana Ruiz (Junio 2003); "II CURSO SOBRE RECACES, INCLUCIONES, INYECCIONES Y JET-GROUTING", y Rodríguez Ortiz (1984)



Los micropilotes consideran diámetros entre 150 y 300 mm por lo general, aunque en algunos casos se pueden suponer diámetros hasta de 75 mm en ocasiones especiales (MFOM)³.

Su longitud varía de acuerdo al tipo de obra que se vaya a realizar y tipo de terreno; no se recomiendan longitudes demasiadamente extensas debido a la geometría con la que estos están diseñados, puesto que se podría causar roturas en el mismo por la presión ejercida del suelo hacia el micropilote. (Manuel Romana Ruiz)²:

- Arenas y gravas compactas 6 a 10 m
- Arcilla media 10 a 15 m
- Suelos duros 10 a 15 m
- Arcilla blanda hasta 20 m
- Suelos especialmente blandos hasta 30 m

2.1.2 Comportamiento del micropilote en roca.

La roca es un material muy adecuado y de gran ventaja para realizar cimentaciones de gran escala, muy buenas para realizarlas mediante cimentaciones superficiales si es que este tipo de suelo no se encuentra demasiadamente profundo, ya que presenta resistencias muy altas y por ende soporta cargas mucho mayores en relación a suelos regulares.

Un micropilote como ya hemos visto, no tiene la suficiente capacidad para trabajar por punta debido a la sección con que está definido (diámetro), por tanto, y cuando este esté actuando en un suelo rocoso es obvio suponer que definitivamente estará la punta del micropilote trabajando directamente y en conjunto con la roca.

Si solo se considerara la resistencia por punta el micropilote a lo largo del fuste podría tener fallas por corte debido a que los esfuerzos de la estructura son transmitidos directamente hacia la punta; claro esto en el supuesto en que el suelo que se encuentre por encima de la roca no presente características cohesivas.

2.1.3 Comportamiento del micropilote en suelos granulares.

Debido a que el suelo granular presenta partículas agrupadas de mayor tamaño que en las de un suelo cohesivo, el micropilote actuará definitivamente mediante su fuste, (interacción suelo – fuste) a menos que se pretenda o se encuentre suelo rocoso o suelo estable.

En suelos que presentan estas características, se deberá profundizar una longitud considerable hasta hallar un suelo con características ideales ya que podría sufrir el micropilote asentamientos considerables cuando exista un movimiento repentino del suelo por consecuencia de sismos u otros factores, los cuales pueden desordenar las partículas del suelo produciendo vacíos y por ende provocando asentamientos visibles.



2.1.4 Comportamiento del micropilote en suelos cohesivos.

A diferencia de los suelos granulares y rocosos, los suelos cohesivos son los que mayor problema producen cuando se pretende cimentar mediante micropilotes, ya que este suelo presenta características como el esponjamiento debido al nivel freático que produce presiones laterales al micropilote, y se contrae cuando el agua deja de actuar directamente con el suelo haciendo que se produzcan fuerzas en el momento y a su vez dejando espacios dentro del terreno.

Es importante saber que en esta clase de suelos los micropilotes definitivamente trabajarán por fuste de una forma mucho mayor a menos claro que se encuentre un suelo rocoso o un suelo favorable que ayudará en gran medida a soportar los esfuerzos transmitidos por la estructura. Como el suelo se expande y se contrae, el micropilote puede sufrir daños por corte y fatiga, que en profundidades considerables es ya un problema, por lo que siempre se busca en este tipo de suelos encontrar un suelo estable a una profundidad menor.

2.2 CLASIFICACIÓN

A continuación se presentará la clasificación propuesta por el Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera del Ministerio de Fomento - España (MFOM)³ que la describe según su forma de transmisión de esfuerzos, tipo de solicitaciones y tipo de inyección, y la propuesta por Bruce (Manuel Romana Ruz)² que únicamente se basa en el tipo de inyección:

Los micropilotes según Ministerio de Fomento; España pueden clasificarse de acuerdo a los siguientes aspectos:

2.2.1 Según la forma de transmisión de los esfuerzos al terreno.

- Individualmente como cimentación profunda, a través del fuste y de la punta.
- Como grupo, actuando sobre una determinada zona del terreno.

2.2.2 Según el tipo de solicitación dominante.

- Esfuerzos axiales de compresión o tracción (normalmente en obras de cimentación)
- Momentos flectores y esfuerzos cortantes (normalmente en obras de estabilización de laderas contención de tierras, paraguas en túneles, etc.).

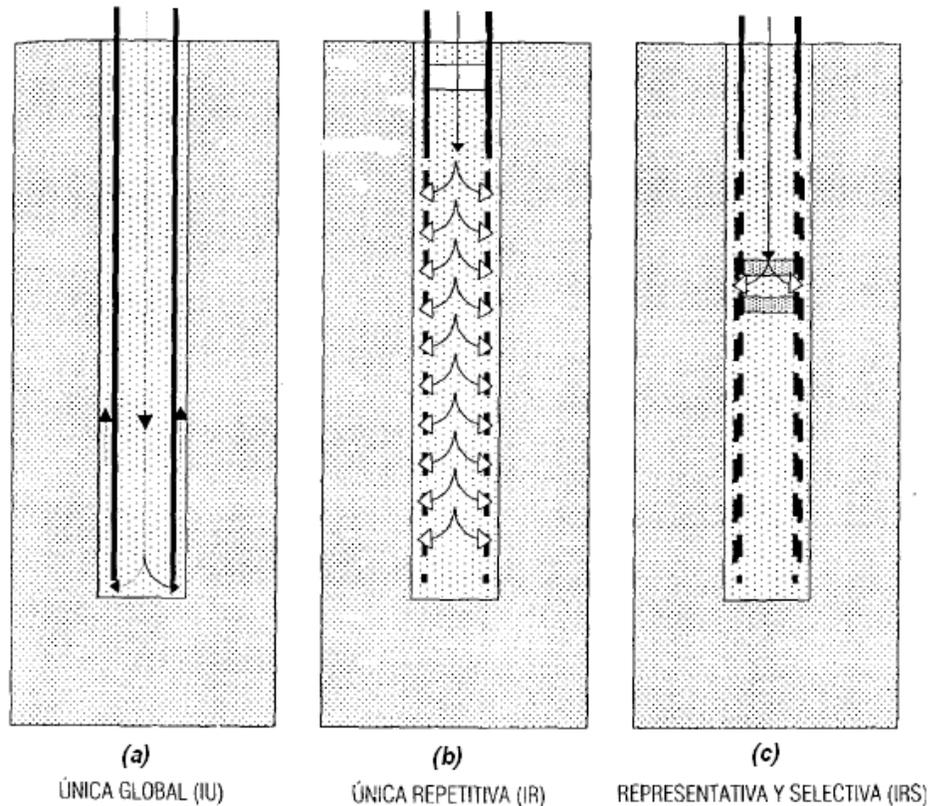
2.2.3 Según el sistema de inyección del mortero de cemento.

La presión/inyección consolida el terreno en el perímetro de la zona del bulbo.

- Los inyectados en una sola fase también denominados de inyección única global (IU). (Fig. 2.2 a).

- Los reinyectados hasta dos veces a través de tubos o circuitos con válvulas anti retorno, también denominados de inyección repetitiva (IR). (Fig. 2.2 b).
- Los reinyectados a través de dos tubos-manguito desde el interior de la tubería de armadura, en toda la longitud del micropilote o en parte, también denominados de inyección repetitiva y selectiva (IRS). (Fig. 2.2 c).

Figura 2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MICROPILOTES SEGÚN AETESS (2000).



Fuente: Antonio Ros Esteban; PROYECTO DE FIN DE CARRERA; Pilotes y micropilotes (Capítulo 13).

Según BRUCE (1995) (Manuel Romana Ruiz)² se distinguen cuatro tipos:

- **Tipo A.** Mortero inyectado por gravedad. Pueden usarse morteros y/o *lechadas*.
- **Tipo B.** Inyección a través de la entubación, mientras se retira. La presión típica está en el rango de $0.3 - 1 \text{ MPa}$ y se limita para evitar el consumo excesivo de lechada. El obturador se sitúa en la boca del micropilote.
- **Tipo C.** Inyección posterior de lechada (15 a 25 minutos después de la colocación del mortero) a través de la entubación (si se deja) o de una tubería específica. La presión es del orden de 1 MPa . Es el sistema **IGU** francés. El obturador se sitúa en la boca del micropilote.

- **Tipo D.** Inyección de lechada en varias fases, con obturadores dentro del tubo. La presión es del orden de 2-8 Mpa y generalmente produce hidrofracturación.
- En el sistema **IRS** francés. Son indispensables los manguitos.

Si lo que se pretende es revisar mas afondo este contenido se recomienda referirse a MFOM³ y Manuel Romana Ruiz².

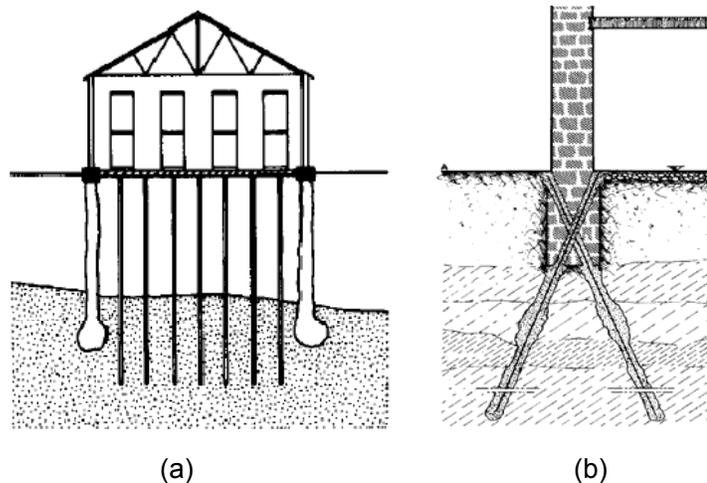
2.3 APLICACIONES DE LOS MICROPILOTES

2.3.1 Como cimentación o recalce de estructuras.

Trabajando básicamente a compresión:

- En obras de **nueva construcción**, su aplicación es en estructuras con espacio de trabajo reducido o acceso complicado, los terrenos difíciles de perforar por intercalación de niveles rocoso (Fig. 2.3a) (MFOM)³.
- En obras ya existentes (**recalces**), incluye la remodelación de aquellas que presentan incrementos de las sollicitaciones, la actuación frente a determinadas patologías geotécnicas, etc. (Fig. 2.3b) (MFOM)³.

Figura 2.3. (a) CIMENTACION CON MICROPILOTES EN OBRAS DE NUEVA CONSTRUCCIÓN. (b) CONEXIÓN DE MICROPILOTES A UNA ZAPATA CORRIDA EXISTENTE (RECALCE).



Fuente: Manuel Romana Ruiz (Junio 2003); Universidad Politécnica de Valencia; "II CURSO SOBRE RECACES, INCLUCIONES, INYECCIONES Y JET-GROUTING".

2.3.2 Constituyendo cortinas o muros discontinuos.

Para contención de terrenos o excavaciones profundas, generalmente se construyen varios formando alineaciones (un mismo plano) en una obra donde se necesite sostener grandes cantidades de tierras, como en taludes verticales, estos son luego

encepados y en muchos de los casos van acompañados de clavos a una cierta altura. (Fig. 2.4).

2.3.3 Trabajando a flexión y tracción.

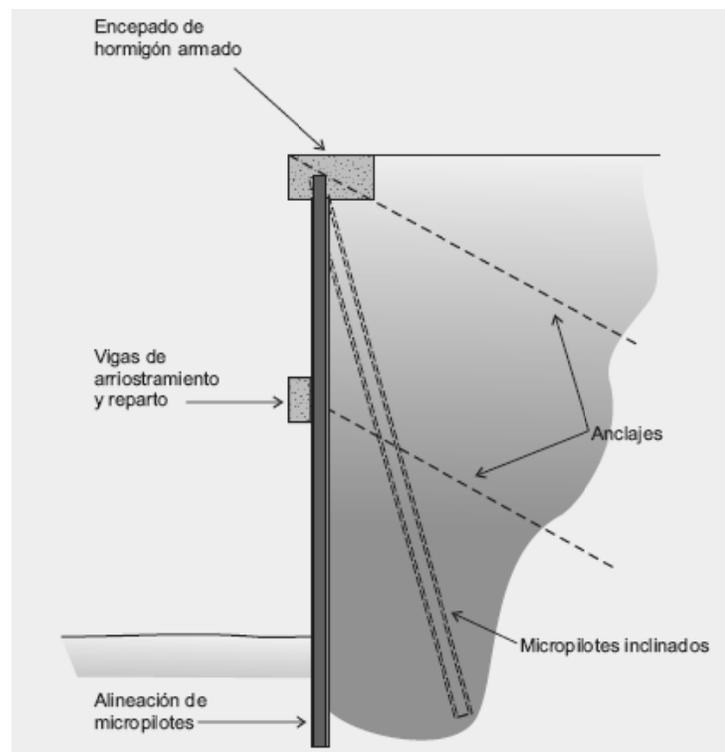
En la corrección de deslizamientos, en esta aplicación los micropilotes se colocan en la mayoría de casos en grupos con inclinaciones y luego de la instalación son encepados en cabeza (MFOM)³.

Esto ayuda a mejorar el coeficiente de seguridad global de los taludes por incremento de la resistencia al corte de las mismas. (Fig. 2.5).

2.3.4 En paraguas de sostenimiento.

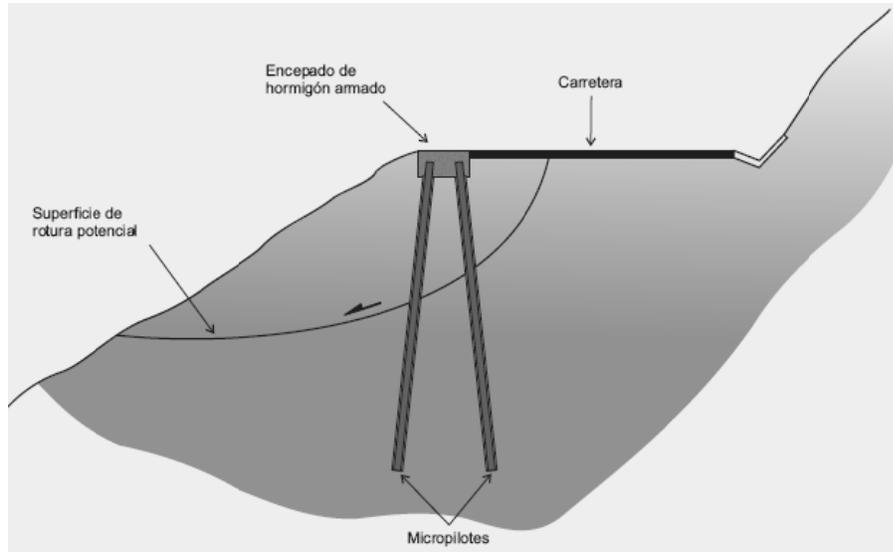
Son diseñados para soportar cargas que actúan en la excavación de túneles generalmente en la etapa inicial antes que se inicie otro tramo o en zonas de especial dificultad como alcantarillas en carreteras. (Fig. 2.6).

Figura 2.4 EJEMPLO DE MICROPILOTES COMO ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN O SOSTENIMIENTO



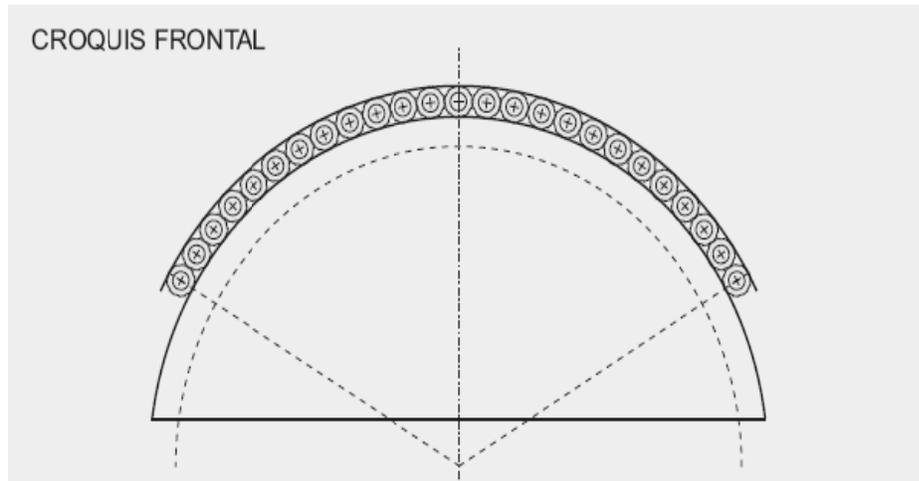
Fuente: Secretaría de Estado de Infraestructuras y Planificación (Octubre 2005); GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA.

Figura 2.5 EJEMPLO DE MICROPILOTES PARA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES O LADERAS



Fuente: Secretaría de Estado de Infraestructuras y Planificación (Octubre 2005); GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA.

Figura 2.6 EJEMPLO DE MICROPILOTES COMO PARAGUAS DE SOSTENIMIENTO

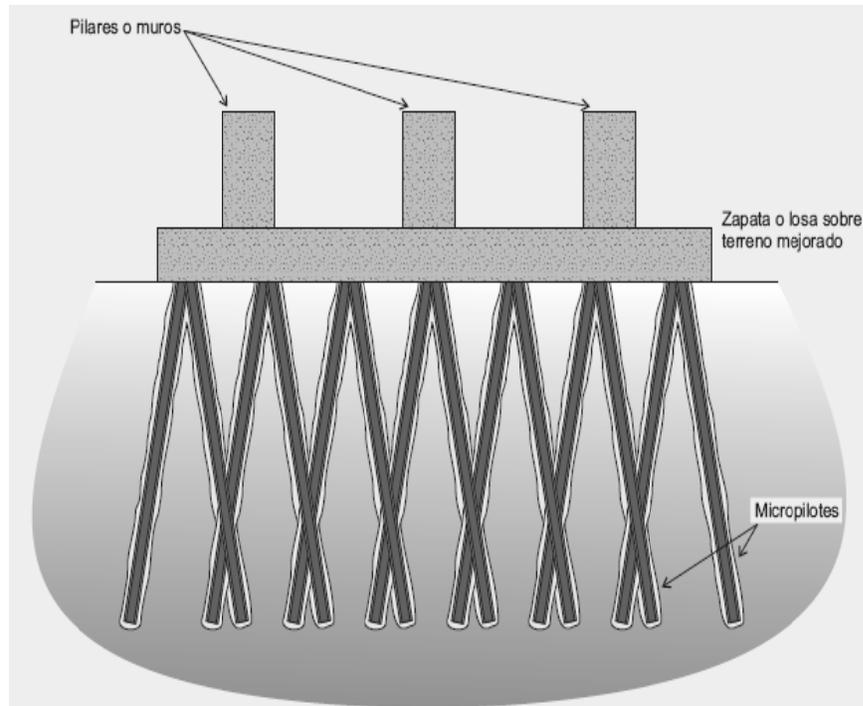


Fuente: Secretaría de Estado de Infraestructuras y Planificación (Octubre 2005); GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA.

2.3.5 Para mejora del terreno.

Sirven especialmente para aumentar la capacidad de soporte del suelo y a su vez reducir el asentamiento que pudiese ocurrir por las cargas aplicadas a la estructura. (Fig. 2.7).

Figura 2.7 EJEMPLO DE MICROPILOTES PARA MEJORA DEL TERRENO



Fuente: Secretaría de Estado de Infraestructuras y Planificación (Octubre 2005); GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA.

2.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MICROPILOTES

VENTAJAS:

1. Rapidez, economía y mínimas molestias en la obra comparado a otros sistemas.
2. Posibilidad de incorporar los micropilotes a la parte sana de la estructura sin la necesidad de ejecutar elementos estructurales adicionales.
3. Facilidad de ejecución en ángulos inclinados, lo cual permite aumentar su capacidad portante frente a fuerzas horizontales.
4. Versatilidad de ejecución en espacios reducidos.
5. Permite solucionar problemas de accesibilidad o perforabilidad con eficacia y rendimiento adecuado.
6. No requieren grandes excavaciones de suelos.



7. Pueden utilizarse en suelos duros, en suelos blandos y en materiales con bloques de roca.
8. No impiden el movimiento de las corrientes de agua.

DESVENTAJAS:

1. La resistencia al cortante de un micropilote es muy pequeña por su gran esbeltez y área relativamente pequeña.
2. La capacidad de resistencia horizontal a tensión de un micropilote inclinado a vertical es relativamente pequeña.
3. Para estabilizar deslizamientos de tamaño mediano o grande se requiere colocar una gran cantidad de micropilotes.
4. No existen metodologías de diseño universalmente aceptadas.
5. Muchos procesos de cálculo son empíricos y sólo se pueden contrastar con pruebas de carga si se pretende aprovechar al máximo la resistencia del micropilote.
6. La calidad depende mucho de que el proceso de ejecución sea riguroso.

2.5 PRUEBAS DE CARGA

Ya que por lo general los cálculos propuestos para el diseño de micropilotes pueden resultar en ocasiones poco precisos, es preferible realizar ensayos o pruebas de carga que dan resultados mucho más confiables y asociados a la realidad, aunque estos son muy costosos.

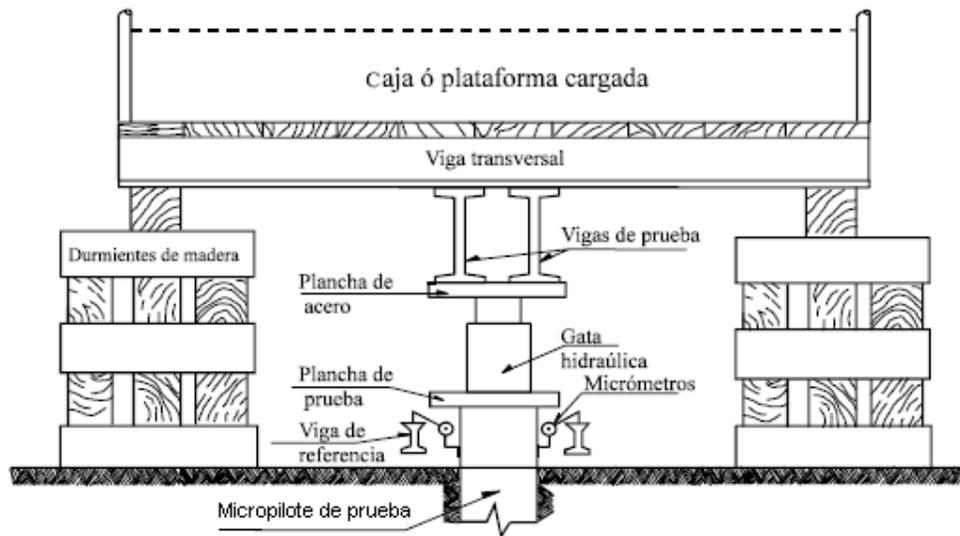
Puesto que la carga total de un micropilote no es muy elevada es más fácil realizar pruebas de carga que con los pilotes ordinarios de más diámetro. (*Fig. 2.8*).

La carga suele aplicarse gradualmente en rangos de 25%, 50%, 75%, 100% y 125% de la carga de servicio prevista (*Jorge E. Alva Hurtado*)⁴. Es posible, pero no usual, superar esta carga si se ensayan micropilotes que después deben trabajar en la cimentación. En todo caso no debe superarse en ellos la carga multiplicada por el coeficiente de seguridad parcial de mayoración.

Cada escalón de carga debe mantenerse hasta que se estabiliza la deformación y al menos 30-45 minutos (*Manuel Romana Ruiz*)². Los criterios de aceptación del micropilote suelen basarse en los asientos totales con la carga máxima y dependerán del método de ejecución (asientos menores cuanto más completo haya sido el proceso de inyección). Dichos asientos totales límite deben ser los tolerables por la estructura, pero no inferiores al 0.5% del diámetro del micropilote (*Manuel Romana Ruiz*)².

La “GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA”, incluye tanto la metodología recomendada para la obtención de la resistencia por fuste a partir de resultados de pruebas de carga, como una serie de aspectos importantes para su realización.

Figura 2.8. SISTEMA DE APLICACIÓN DE CARGA POR GATA HIDRÁULICA ACTUANDO FRENTE A PLATAFORMA CARGADA



Fuente: Jorge E. Alva Hurtado, PhD; CIMENTACIONES PROFUNDAS; CISMID-FIC-UNI

CAPITULO III



3 ANÁLISIS Y DISEÑO DE MICROPILOTES

En esta parte se verá el proceso de cálculo con el que están hechas las herramientas de diseño y de análisis tanto para carga vertical y carga lateral para micropilotes individuales y en grupo concluyendo con una información adicional de su proceso constructivo en obra.

Todo el diseño se basa en la metodología y el procedimiento utilizado por la “*GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA*” (MFOM)³, excepto el análisis de carga lateral que utiliza otro procedimiento basándose en el programa Opensees y que será visto más adelante.

Para el diseño de micropilotes sometidos a carga vertical, la carga actuante sobre el elemento será mayorada, tomando en cuenta sus respectivos factores de carga.

Si la cimentación es utilizada en estructuras donde solamente se necesite recalzar (reforzar la cimentación), se deberá tomar los requerimientos provistos por *ACI 318S-05*⁶ que se refiere a los requisitos de reglamento para concreto estructural, cuyos factores de carga están dispuestos para satisfacer las condiciones de carga a las que podría estar expuesta la estructura. (MFOM)³.

Por otra parte si el diseño de cimentación mediante micropilotes deberá ser usado en problemas viales, se recurrirá a los factores de carga propuestos por *AASHTO-04*¹² y *EHE* (Nueva Instrucción de Hormigón Estructural) (MFOM)³.

3.1 COMPROBACIÓN FRENTE AL HUNDIMIENTO

A continuación se dará a conocer el proceso de cálculo para comprobar el hundimiento en micropilotes que aplica el Ministerio de Fomento – España (MFOM)³ y que guarda relación con el método de Bustamante y algunos otros procedimientos que servirán de recurso si no se desea calcular mediante el método establecido.

Definición.- El fallo por hundimiento se produce cuando la carga aplicada a la estructura genera tensiones en el terreno que sobrepasan la capacidad portante del suelo produciéndose un **fallo en la estabilidad de la cimentación** que eventualmente puede causar el colapso total o parcial de la estructura. Dependiendo de la rigidez del terreno, este fallo será lento o rápido, localizado o distribuido (Ing. Marco Antonio Boidi)¹⁵.

Cuando se pretenda calcular la resistencia de cálculo frente al modo de fallo de hundimiento **Qu**, se deberá considerar lo siguiente:

$$Q_u \geq P_c$$

Donde:

Qu = Resistencia última frente al hundimiento.



P_c = Carga axial a compresión.

La resistencia total del micropilote es igual a la suma de la resistencia por fuste y la resistencia por punta, y que dependen tanto de las características del micropilote como las del estrato en el que está enterrado.

En el cálculo de la resistencia total frente al modo de falla de hundimiento en micropilotes sometidos a cargas verticales de compresión, es necesario que se tome en cuenta las siguientes condiciones que se explican a continuación:

- a) Si no es necesario considerar **la resistencia por punta**, solamente se tendrá en consideración el cálculo de la resistencia por fuste del micropilotes.

$$Q_u = Q_f = A_l \cdot f$$

Donde:

- Q_u** = Resistencia última frente al hundimiento.
 Q_f = Resistencia por fuste frente a esfuerzos de compresión.
 A_l = Área lateral del micropilote.
 f = Rozamiento unitario por fuste frente a esfuerzos de compresión (refiérase a enunciado **3.1.1**).

Si se necesita calcular **Q_f** en suelos homogéneos, la ecuación 3.2 anterior resulta muy conveniente, de lo contrario si el cálculo es necesario realizarlo en suelos heterogéneos como es el caso de la mayoría de los que se encuentran en nuestro entorno, entonces se deberá efectuar el cálculo para cada estrato y considerarse el producto del área lateral del micropilote en cada zona por su rozamiento unitario por fuste como sigue:

$$Q_u = \sum_{i=1}^n A_{l_i} \cdot (f)$$

Donde:

- Q_u** = Resistencia última frente al hundimiento.
 n = Número de tramos con el que está compuesto todo el terreno a micropilotar.
 A_{l_i} = Área lateral del micropilote comprendida en cada tramo.
 f = Rozamiento unitario por fuste frente a esfuerzos de compresión en el tramo correspondiente al estrato.

- b) Si se toma en cuenta la resistencia por punta, en este caso la resistencia total de fuste al modo de fallo de hundimiento **Q_u** será la suma de las dos resistencias tanto por fuste y por punta.



$$Q_u = Q_p + Q_f$$

Donde:

- Q_u** = Resistencia última frente al hundimiento.
- Q_p** = Resistencia por punta frente a esfuerzos de compresión.
- Q_f** = Resistencia por fuste frente a esfuerzos de compresión.

3.1.1 Resistencia de cálculo por fuste.

Para obtener mejores resultados en el cálculo de la resistencia por fuste del micropilote se lo realiza preferiblemente mediante ensayos de carga descrito en este capítulo, esto si se tiene la posibilidad de hacerlo; de lo contrario se procederá a efectuar el cálculo mediante métodos teóricos o correlaciones empíricas según MFOM³ y que a continuación se detallan.

3.1.1.1 Método teórico.

El cálculo correspondiente al rozamiento unitario por fuste a una determinada profundidad **z**, se la podrá definir según como sigue la ecuación siguiente:

Donde:

- f** = Rozamiento unitario por fuste frente a esfuerzos de compresión.
- z** = Profundidad del estrato desde la superficie del terreno.
- C** = Cohesión del suelo en el tramo de terreno a calcular.
- δ** = Ángulo de rozamiento del contacto terreno-fuste del micropilote a la profundidad **z**. (Es una fracción del ángulo de rozamiento interno efectivo del terreno ϕ).

$$\delta = kr \cdot \phi$$

- Kr** = Relación entre los ángulos de rozamiento del contacto terreno-fuste e interno del terreno. Coeficiente utilizado habitualmente para micropilotes; $(2/3 \leq kr \leq 1)$ (MFOM)³.

- $\sigma'_{h(z)}$** = Presión horizontal efectiva del terreno a la profundidad **z**. Esto se calcula dependiendo del tipo de inyección:



- Inyecciones tipo IR o IRS, con registros de presiones de inyección, para profundidades $z \geq 5 \text{ m}$ (MFOM)³:

$$\sigma'_{H(Z)} = k_0 \cdot \sigma'_{v(Z)} + \frac{Pi}{3}$$

- Resto de casos:

$$\sigma'_{H(Z)} = k_0 \cdot \sigma'_{v(Z)}$$

Donde:

Pi = Presión de inyección con que es introducido el hormigón para formar el micropilote. Se verificara de acuerdo a la clasificación descrita en el **párrafo 2.2.3** (MFOM)³.

k₀ = Coeficiente de empuje al reposo (MFOM)³.

- Terrenos normalmente consolidados.

$$k_o = (1 - \text{sen } \phi)$$

- Terrenos sobreconsolidados.

$$k_o = (1 - \text{sen } \phi) \sqrt{Roc}$$

Roc = Razón de sobreconsolidación. (MFOM)³.

$\sigma'_{v(z)}$ = Presión vertical efectiva del terreno a la profundidad z. (Braja Das)⁵.

- En terrenos saturados:

$$\sigma'_{v(Z)} = (\gamma - \gamma_{sat}) \cdot z$$

- En terrenos no saturados:

$$\sigma'_{v(Z)} = \gamma \cdot z$$

Donde:

γ = Peso específico del suelo a la profundidad z

γ_{sat} = Peso específico saturado del suelo a la profundidad z.

Z = Espesor de cada estrato.



F_c, F_ϕ = Coeficientes de minoración que dependen del tipo de aplicación y que puede obtenerse del cuadro 3.1 (MFOM)³.

Cuadro 3.1 COEFICIENTES F_c, F_ϕ

TIPO DE APLICACIÓN	F_c	F_ϕ
Estructuras de cimentación de nueva construcción	1.5	1.5
Recalce de estructuras de cimentación existente	1.2	1.2

Fuente: GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA; (Octubre 2005).

3.1.1.2 Correlaciones empíricas.

Cuando se desee calcular el rozamiento unitario por fuste mediante correlaciones empíricas se seguirá la ecuación que a continuación se detalla:

$$f = \frac{f_{lim}}{Fr}$$

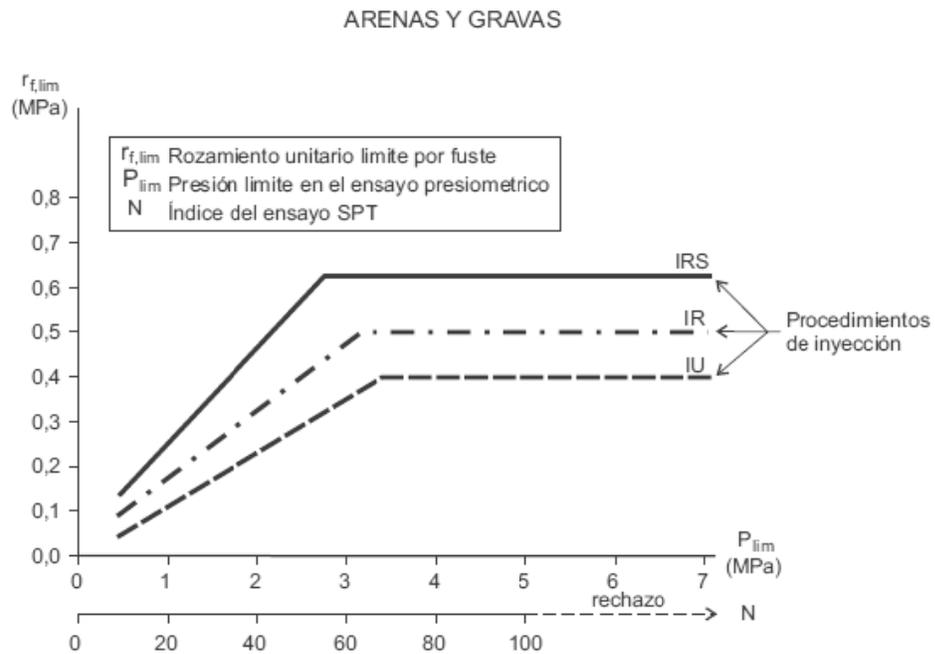
Donde:

- F = Rozamiento unitario por fuste frente a esfuerzos de compresión.
- f_{lim} = Rozamiento unitario límite por fuste, que puede ser tomado de la **figura 3.1(a),(b)**, según Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera; pág. 30).(MFOM)³.
- Fr = Coeficiente de minoración que tiene en cuenta la duración de la función estructural de los micropilotes, el cual se visualiza en el **cuadro 3.2**.

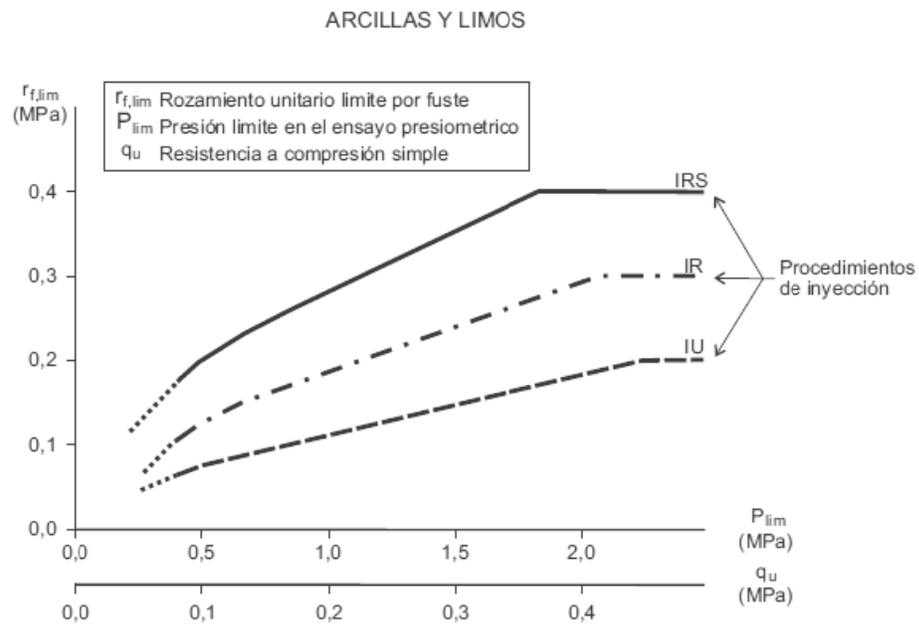
Se procede a entrar en la tabla en la parte inferior, ya sea con el índice del ensayo SPT (N) o con la presión límite en el ensayo presiométrico P_{lim} y verificando cual va a hacer el procedimiento de inyección podemos obtener el rozamiento unitario límite por fuste, esto en **arenas y gravas**. En cuanto a **Arcillas y Limos** se ingresara ya se con la resistencia a compresión simple del suelo q_u (MFOM)³ o la presión límite en el ensayo presiométrico P_{lim} .

Si se desea encontrar información más detallada acerca del cálculo de la resistencia unitaria por fuste mediante correlaciones empíricas se recomienda revisar la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (MFOM)³.

Figura 3.1 ROZAMIENTO UNITARIO LÍMITE POR FUSTE



(a)



(b)

Fuente: GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA; (Octubre 2005).



Cuadro 3.2 COEFICIENTE F_r

DURACIÓN	F_r
Obras donde los micropilotes tienen una función estructural de duración inferior o igual a seis (6) meses	1.45
Obras donde los micropilotes tienen una función estructural de duración superior a seis (6) meses	1.65

Fuente: GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA; (Octubre 2005).

3.1.2 Resistencia por punta.

3.1.2.1 Resistencia por punta en suelos.

En este caso, como la sección del micropilote es muy pequeña resulta muy poco ventajosa, por lo general no se considera la colaboración por punta en el terreno.

Aun así, si se prefiere la colaboración de la resistencia por punta Q_p , habrá de adoptarse como valor máximo de la misma el quince por ciento (15%) de la resistencia de cálculo por fuste frente a esfuerzos de compresión $(MFOM)^3$.

$$Q_p \leq 0.15Q_f$$

Donde:

- Q_p = Resistencia por punta frente a esfuerzos de compresión.
- Q_f = Resistencia por fuste frente a esfuerzos de compresión.

3.1.2.2 Resistencia considerando el empotramiento en roca.

Para poder considerar que el micropilote está empotrado en roca es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos que involucran la zona de la punta:

- La roca presente un grado de meteorización inferior o igual a nivel III según la escala ISRM, el índice RQD (*Rock Quality Designation*) > 60% y la resistencia a compresión simple de la roca $q_u > 20 MPa$. Revisar la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carreteras; pág. 121 $(MFOM)^3$.
- El empotramiento del micropilote en roca sea $L_{emp} \geq 6D$ medidos sobre el plano de la punta.

Si es el caso en donde el micropilote está empotrado en roca se deberá realizar el cálculo mediante la siguiente ecuación:



$$Q_{pr} = A l_e \cdot f_{e,d} + A_{pr} \cdot q_{pe,d}$$

Donde:

- Q_{pr} = Resistencia por punta en roca.
- $A l_e$ = Área lateral del micropilote en el empotramiento en roca.
- $f_{e,d}$ = Resistencia unitaria por fuste en el tramo empotrado.
- A_{pr} = Área de la sección recta de la punta en el empotramiento en roca.
- $q_{pe,d}$ = Resistencia unitaria por punta en el tramo empotrado.

Los parámetros de $f_{e,d}$ y $q_{pe,d}$ pueden tomarse de la **cuadro 3.3** para rocas moderadamente meteorizadas, ligeramente meteorizadas y rocas sanas o frescas, según Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (MFOM)³.

Cuadro 3.3 RESISTENCIA UNITARIA DE CÁLCULO EN EL EMPOTRAMIENTO EN ROCA, POR FUSTE Y PUNTA

TIPO DE ROCA	$f_{e,d}$ (MPa)	$q_{pe,d}$ (MPa)
Margas margocalizas	0.15 - 0.40	0.07*qu
Pizarra y otros esquistos	0.20 - 0.30	0.07*qu
Areniscas	0.30 - 0.45	0.07*qu
Calizas y dolomitas	0.40 - 0.50	0.10*qu
Granitos y basaltos	0.40 - 0.60	0.10*qu

Fuente: GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA; (Octubre 2005).

3.1.3 Otros métodos de cálculo

A continuación se detallarán en breve otros métodos de cálculo para comprobar la resistencia frente al hundimiento en micropilotes, para encontrar mayor información se recomienda revisar (Manuel Romana Ruiz)².

3.1.3.1 Método tradicional para “Pali Radice o Micropilotes”.

En 1985 LIZZI (Manuel Romana Ruiz)² propuso un método para calcular la carga última en un micropilote como sigue:

$$Q_u = \pi \cdot D \cdot L \cdot K \cdot I$$

Donde:

- Q_u = Carga última del micropilote a compresión (no incluye coeficiente de seguridad).



- D** = Diámetro nominal (de perforación).
L = Longitud del micropilote.
K = Coeficiente que representa el rozamiento por el fuste. (Cuadro 3.4).
I = Coeficiente adimensional que depende del diámetro. (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4 COEFICIENTE DE LA FÓRMULA DE LIZZI (1985)

SUELO	K (Kpa)	DIÁMETRO (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 el fuste K		Valor del coeficiente I	

Fuente: Manuel Romana Ruiz (Junio 2003); Universidad Politécnica de Valencia; "II CURSO SOBRE RECACES, INCLUCIONES, INYECCIONES Y JET-GROUTING"

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 micropilotes convencionales, que es de **100 KPa**. La diferencia es imputada por Lizzi al contacto estrecho entre pilote y terreno y al diámetro real, mayor que el nominal. Con este método se ha calculado la inmensa mayoría de los "pali radice o micropilotes".

3.1.3.2 Métodos convencionales.

Para estos métodos la resistencia de un micropilote vale (Manuel Romana Ruiz)²:

$$Q_u = \frac{1}{F_1} \left(\pi \cdot D \cdot L \cdot Q_f \frac{1}{F_2} + \frac{\pi \cdot D^2}{4} Q_p \frac{1}{F_3} \right)$$

Donde:

- Qu** = Carga nominal admisible del micropilote.
F1 = Factor de mayoración de cargas. (Cuadro 3.5).
F2,F3 = Coeficientes de seguridad de minoración de resistencia, fuste y punta.
D = Diámetro nominal (de perforación).
L = Longitud.
Qf = Rozamiento por fuste.
Qp = Resistencia al hundimiento por punta.



Cuadro 3.5 VALORES DEL COEFICIENTE F1 (OTEO, 2001)⁵

F1	RESPONSABILIDAD	IMPORTANCIA ECONÓMICA
1.25	Poca	Poca
1.40	Poca	Bastante
1.50	Grande	Grande

Nota: la variación total de F1 es de 1.2 - 1.6

$$F2 = 1.5 \text{ a } 2$$

$$F3 = 3 \text{ a } 4$$

Fuente: Manuel Romana Ruiz (Junio 2003); Universidad Politécnica de Valencia; "II CURSO SOBRE RECACES, INCLUCIONES, INYECCIONES Y JET-GROUTING"

En realidad la resistencia por punta es mucho menor que la resistencia por el fuste y en micropilotes largos puede no llegar a notarse, por tanto puede llegar a despreciarse (*Manuel Romana Ruiz*)².

$$q_{sia} = \frac{C_i}{F_c} + \frac{(\sigma'_{vio} + \sigma'_{iny}) \cdot tg \phi_i}{F_\phi}$$

Donde:

q_{sia} = Resistencia admisible en el estrato i.

C_i = Cohesión efectiva en el estrato i.

σ'_{vio} = Presión vertical efectiva del estrato i antes de la construcción del micropilote.

σ'_{iny} = Sobrepresión de inyección efectiva en el estrato i.

ϕ_i = Ángulo de rozamiento efectivo en el estrato i.

F_ϕ = Coeficiente de seguridad parcial de minoración de rozamiento $tg \phi$.

Y la resistencia del micropilote vale:

$$Qu = \frac{1}{F1} \sum \pi \cdot D \cdot L_i \cdot q_{sia}$$

Según OTEO (*Manuel Romana Ruiz*)² pueden adoptarse los siguientes valores de los coeficientes parciales de seguridad para cohesión y rozamiento:

$$F_c = 1.25 \text{ a } 1.60$$

$$F_\phi = 1.25 \text{ a } 1.35$$

En la práctica el valor de **C** será muy bajo tanto en arenas como en arcillas normalmente consolidadas, y en cambio será el más significativo para los tramos de micropilote que atraviesen arcillas muy preconsolidadas o rocas.



Si no se dispone de información geotécnica precisa puede utilizarse los ábacos de BUSTAMANTE para estimar q_{si} , el cual no incluye coeficiente parcial de seguridad (Manuel Romana Ruiz)².

3.2 COMPROBACIÓN FRENTE AL ARRANQUE

3.2.1 Resistencia frente al arranque.

Cuando el micropilote es arrancado del suelo por acción de la carga a tracción y en donde únicamente la resistencia unitaria por fuste es la que evita que el elemento sea extraído de su entorno, nos referimos a una resistencia de cálculo frente al arranque, en donde se necesita e intervienen las propiedades del suelo.

La resistencia de cálculo frente al arranque de un micropilote deberá ser mayor o igual que el esfuerzo axial a tracción que está soportando el mismo, entonces:

$$Q_{ar} \geq P_t$$

Donde:

- Q_{ar} = Resistencia última frente al arranque (tracción).
- P_t = Carga axial a tracción.

La resistencia de cálculo frente al arranque se obtiene como la suma de la resistencia por fuste frente a esfuerzos de tracción y la componente del peso propio del micropilote en la dirección de su eje, minorado tal y como se muestra a continuación:

$$Q_{ar} = Qf_t + \frac{W_e}{F_{we}}$$

Donde:

- Q_{ar} = Resistencia última frente al arranque (tracción).
- W_e = Componente del peso propio del micropilote en la dirección de su eje.
- F_{we} = Coeficiente de minoración. Salvo justificación expresa en contra, se deberá tomar un valor $F_{we} = 1.2$ (MFOM)³.
- Qf_t = Resistencia por fuste del micropilote frente a esfuerzos de tracción.

$$Qf_t = Al \cdot f_t$$

Donde:

- f_t = Rozamiento unitario por fuste (tracción).
- Al = Área lateral del micropilote.



Para calcular el rozamiento unitario por fuste frente a esfuerzos de tracción, se lo realiza como primera opción mediante ensayos de carga IN SITU según los criterios propuestos por la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (MFOM)³.

De lo contrario y en ausencia de lo expuesto anteriormente se puede obtener el valor mediante métodos teóricos y correlaciones empíricas como sigue (MFOM)³:

$$f_t = n \cdot f$$

Donde:

f_t = Rozamiento unitario por fuste (tracción).

n = Coeficiente:

Micropilotes sometidos alternativamente a cargas de compresión y tracción: $n = 0.60$.

Micropilotes sometidos únicamente a esfuerzos de tracción: $n = 0.75$.

f = Rozamiento unitario por fuste frente a esfuerzos de compresión. (Véase párrafo 3.1.1).

3.3 FALLO ESTRUCTURAL DE LOS MICROPILOTES

Todo micropilote está expuesto a fallar estructuralmente tanto a compresión, tracción, flexión y cortante puesto que están sometidos a cargas que generan estas reacciones. Las cargas son transmitidas al elemento directamente ya sea por su encepado o por la estructura que están sosteniendo, si el elemento no es capaz de resistir estos agentes, se pueden producir fractura en el micropilote tanto por las cargas de la estructura como por las producidas por el suelo. Es decir la estructura del elemento con relación a su entorno se vuelve inestable.

Todo el procedimiento que a continuación se detalla a si como las condiciones que utilizan las ecuaciones y sus coeficientes parciales de seguridad están basados e la guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (MFOM)³.

3.3.1 Resistencia estructural a compresión.

Debe comprobarse lo siguiente:

$$Q_{ec} \geq P_c$$

Q_{ec} = Resistencia estructural del micropilote sometido a esfuerzos de compresión.

P_c = Carga axial a compresión.



La resistencia estructural del micropilote a compresión será:

Donde:

A_c = Sección neta del mortero, descontando armadura. Para calcular se debe utilizar el diámetro nominal del micropilote.

f_{cd} = Resistencia del mortero o lechada de cemento a compresión:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

f_{ck} = Resistencia característica del mortero de cemento a compresión simple, a los 28 días.

γ_c = Coeficiente parcial de seguridad para el mortero igual a $\gamma_c = 1.50$.

A_s = Sección total de las barras corrugadas de acero

f_{sd} = Resistencia de las barras de acero:

$$f_{sd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_s} \leq 400MPa$$

f_{sk} = Límite elástico del acero de las armaduras corrugadas, que puede obtenerse del **cuadro 3.6**. Si se dispone de esa clasificación, de lo contrario se escogerá los valores que se dispongan en el mercado para el tipo de acero.

γ_s = Coeficiente parcial de seguridad para el acero de las armaduras corrugadas, se toma $\gamma_s = 1.15$.

f_{yd} = Resistencia de la armadura tubular de acero:

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_a} \leq 400MPa$$

f_y = Límite elástico del acero de la armadura tubular que puede obtenerse de la **cuadro 3.7**. Si se dispone de esa clasificación, de lo contrario se escogerá los valores que se dispongan en el mercado para el tipo de acero.

γ_a = Coeficiente parcial de seguridad para el acero de la armadura tubular, se tomará $\gamma_a = 1.10$.

A_{ac} = Sección de la armadura tubular de acero



$$A_{ac} = \frac{\pi}{4} [(d_e - 2r_e)^2 - d_j^2] \cdot F_{u,c}$$

Donde:

- d_e = Diámetro exterior nominal de la armadura tubular.
- r_e = Reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión, que puede obtenerse del **cuadro 3.8**.
- d_j = Diámetro interior nominal de la armadura tubular.
- $F_{u,c}$ = Coeficiente de minoración del área de la armadura en función del tipo de unión (compresión). Salvo justificación expresa se deberá adoptar los valores del **cuadro 3.9**
- F_e = Coeficiente de influencia del tipo de ejecución, que tiene en cuenta la naturaleza del terreno y el sistema de perforación, el cual se tomará del **cuadro 3.10**.

Cuadro 3.6 LÍMITE ELÁSTICO DE LOS ACEROS PARA LAS BARRAS CORRUGADAS DE ACERO, fsk

DESIGNACIÓN EN UNE 36068:94	LÍMITE ELÁSTICO fsc (Mpa)
B 400 S	400
B 500 S	500

Fuente: GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA; (Octubre 2005).

Cuadro 3.7 LÍMITE ELÁSTICO DE LOS ACEROS PARA LAS ARMADURAS TUBULARES, fy

DESIGNACIÓN UNE EN 10027	LÍMITE ELÁSTICO fy (Mpa)
S 235	235
S 275	275
S 355	355
S 420	420
S 460	460

Fuente: GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA; (Octubre 2005).



Cuadro 3.8 REDUCCIÓN DE ESPESOR DE ARMADURA POR EFECTO DE LA CORROSIÓN (re), mm

TIPO DE TERRENO	VIDA ÚTIL REQUERIDA AL MICROPILOTE (años)				
	5	25	50	75	100
Suelos naturales sin alterar	0.00	0.30	0.60	0.90	1.20
Suelos naturales contaminados o suelos industriales	0.15	0.75	1.50	2.25	3.00
Suelos naturales agresivos (turbas, ciénagas, etc..)	0.20	1.00	1.75	2.50	3.25
Rellenos no agresivos sin compactar	0.18	0.70	1.20	1.70	2.20
Rellenos agresivos sin compactar (cenizas, escorias, etc..)	0.50	2.00	3.25	4.50	5.75

Fuente: GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA; (Octubre 2005).

Cuadro 3.9 COEFICIENTE Fu,c

Mediante manguitos exteriores doblemente roscados, sin disminución de sección	1.0
De rosca machihembrada con sección ensanchada	
De rosca machihembrada, sin sección ensanchada y con contacto a tope en ambos extremos	
Otras uniones diseñadas específicamente para no sufrir pérdidas de resistencia	
Resto de casos	0.5

Fuente: GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA; (Octubre 2005).

Cuadro 3.10 COEFICIENTE F_e

TIPO DE TERRENO Y DE PERFORACIÓN		
T I	Terreno con nivel freático por encima de la punta del micropilote y perforación sin revestir, sin empleo de lodos	1.50
T II	Terreno con nivel freático permanente bajo la punta del micropilote y perforación sin revestir, sin empleo de lodos	1.30
T II	Cualquier tipo de terreno perforado con lodos	1.15
T IV	Cualquier tipo de terreno perforado al amparo de revestimiento recuperable	1.05
T V	Micropilote con tubería de revestimiento dejada <<in situ>> de forma permanente (camisa perdida)	1.00

Fuente: GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA; (Octubre 2005).

R = Factor empírico de pandeo o coeficiente de reducción de la capacidad estructural del micropilote por efecto del pandeo, cuyo valor se tomará como



se indica a continuación:

Se deberá considerar $R \leq 1$, cuando:

- El micropilote esté rodeado por arenas con compacidades flojas a medias o suelos cohesivos con consistencias blandas a medias. Mayor información en Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera, capítulo 6 (MFOM)³.
- Donde existan zonas del micropilote sin cohesión lateral, por la presencia de huecos o por estar rodeado de terrenos inestables.

Para el resto de casos $R = 1$

Por otra parte si el diseñador lo desea se puede calcular el valor de R según la siguiente ecuación (Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera, capítulo 6) (MFOM)³.

$$R = 1.07 - 0.027C_R \leq 1$$

Donde:

C_R = Coeficiente adimensional que se representa en el **cuadro 3.11**

Cuadro 3.11 COEFICIENTE C_R

TIPO DE COACCIÓN LATERAL	
Fangos y turbas con $15 \text{ KPa} \leq Su \text{ (KPa)} \leq 25$	18 a 12
Arcillas y limos blandos con $15 \text{ KPa} \leq Su \text{ (KPa)} \leq 25$	12 a 8
Suelos no cohesivos de compacidad media ($0,35 < ID < 0,65$) que cumplan alguno de los siguientes requisitos:	8 a 7
1.- Encontrarse permanentemente por encima del nivel freático	
2.- Presentar un coeficiente de uniformidad mayor o igual que dos ($D60/D10 \geq 2$)	
Suelos cohesivos de consistencia media ($25 \text{ KPa} \leq Su \text{ (KPa)} \leq 50$)	
<i>Libre (sin terreno o rodeado de terreno inestable)</i>	H/DR

DR : Diámetro del micropilote en la zona de pandeo. Cuando en la zona libre o rodeado de terreno inestable) se haya colocado tubería de revestimiento perdida, DR será el diámetro de dicha tubería: si no fuera así se tomará el diámetro exterior de la armadura tubular ($DR = De$).

H : Longitud de la zona libre (sin terreno o rodeado de terreno inestable).

Fuente: GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA; (Octubre 2005).



3.3.2 Resistencia estructural a tracción.

Un micropilote también puede estar expuesto a fallo estructural a tracción, debido a factores como el viento sobre el elemento cuando este es de gran envergadura o por lo general y en el caso más usual, por una carga que actúa en cierto modo a la estructura (rótulos estatales, pasos a desnivel, etc.). Para el cálculo se tomara solamente la contribución del acero que componga al elemento puesto que este soporta más resistencia a la tensión ($MFOM$)³.

Esta resistencia a tracción es la que resistiría el micropilote conjuntamente con la armadura, descartando ante todo la interacción del suelo con el elemento.

Para saber si el diseño es óptimo se debe comprobar que:

$$Q_{et} \geq P_t$$

Donde:

Q_{et} = Resistencia estructural del micropilote a compresión.

P_t = Carga axial a tracción.

La resistencia estructural del micropilote a esfuerzos de tracción se calculo como:

$$Q_{et} = (A_s \cdot f_{sd} + A_{at} \cdot f_{yd}) \cdot \frac{1}{1.10}$$

Los factores A_s , f_{sd} , y f_{yd} se calcularán similarmente a las ecuaciones propuestas en el **enunciado 3.3.1**.

El factor A_{at} se calculará de la siguiente manera:

$$A_{at} = \frac{\pi}{4} [(d_e - 2r_e)^2 - d_j^2] \cdot F_{u,t}$$

Donde:

d_e = Diámetro exterior nominal de la armadura tubular.

r_e = Reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión, que puede obtenerse del cuadro **3.8**.

d_j = Diámetro interior nominal de la armadura tubular.

$F_{u,t}$ = Coeficiente de minoración del área de la armadura en función del tipo de unión (compresión). Salvo justificación expresa se deberá adoptar los valores del **cuadro 3.12**.



Cuadro 3.12 COEFICIENTE $F_{u,t}$

Mediante manguitos exteriores doblemente roscados, sin disminución de sección	1.0
De rosca machihembrada con sección ensanchada	
Otras uniones diseñadas específicamente para no sufrir pérdidas de resistencia	
Resto de casos	0.5

Fuente: GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA; (Octubre 2005).

3.3.3 Tope estructural.

Se conoce como tope estructural al esfuerzo último o máximo que puede soportar un micropilote llegando al límite de rotura bajo una carga aplicada principalmente bajo cargas a compresión, considerando coeficientes de seguridad de minoración tanto para resistencia característica del hormigón como para el acero.

Existen varios métodos de cálculo propuestos por varios autores para obtener el tope estructural del micropilote que a continuación se detallan, claro estos varían entre uno y otro por que las ecuaciones expuestas son empíricas aunque si se desea profundizar más acerca de este cálculo se recomienda revisar (*Manuel Romana Ruiz*)².

Tope estructural (Jiménez Salas).

$$T = 0.25 \cdot f_{ck} \cdot A_c + 0.4 \cdot f_{yk} \cdot A_{st}$$

Donde

- T = Tope estructural.
- A_c = Sección teórica nominal del mortero (si hubiese acero en el elemento se le debería restar la sección del acero a la sección de hormigón).
- A_{st} = Sección del acero. (Incluido el entubado y las barras de acero si las hubiera). $A_s + ((\pi \cdot de^2/4) - (\pi \cdot dj^2/4))$
- f_{ck} = Resistencia característica del hormigón.
 $0.25f_{ck} \leq 6 \text{ Mpa}$.
- f_{yk} = Resistencia característica del acero (f_{yk} deberá ser el mayor de f_{sk} y f_y).
 $0.40f_{yk} \leq 140 \text{ Mpa}$.

Lo que implica coeficientes de seguridad de 4 a 2.5 para el hormigón y el acero y resistencias máximas de cálculo de 24 MPa y 350 MPa respectivamente (*Manuel Romana Ruiz*)².

Tope estructural (Fórmula EH).

$$T = \frac{1}{1.2 \cdot 1.8} (0.85 \cdot f_{ck} \cdot A_c + f_{yk} \cdot A_{st})$$



Donde:

- T = Tope estructural.
- A_c = Sección teórica nominal del mortero (si hubiese acero en el elemento se le debería restar la sección del acero a la sección de hormigón).
- A_{st} = Sección del acero. (Incluido el entubado y las barras de acero si los hubiera). $A_s + ((\pi \cdot de^2/4) - (\pi \cdot dj^2/4))$
- f_{ck} = Resistencia característica del hormigón.
 $0.25f_{ck} \leq 6 \text{ MPa}$.
- f_{yk} = Resistencia característica del acero (f_{yk} deberá ser el mayor de f_{sk} y f_y).
 $0.40f_{yk} \leq 140 \text{ MPa}$.

Con la condición que: $A > 0.2B$, lo que implica coeficientes de seguridad parciales de 1.2 y 1.8 y un coeficiente de seguridad global de 2.16 (Manuel Romana Ruiz)².

Tope estructural según EHE.

$$T = \frac{1}{F_1} \left(\frac{0.85 \cdot A_c \cdot f_{ck}}{1.5} + \frac{A_{st} \cdot f_{yk}}{1.15} \right)$$

Donde:

- T = Tope estructural.
- A_c = Sección teórica nominal del mortero (si hubiese acero en el elemento se le debería restar la sección del acero a la sección de hormigón).
- A_{st} = Sección del acero. (Incluido el entubado y las barras de acero si los hubiera). $A_s + ((\pi \cdot de^2/4) - (\pi \cdot dj^2/4))$
- f_{ck} = Resistencia característica del hormigón.
 $0.25f_{ck} \leq 6 \text{ Mpa}$.
- f_{yk} = Resistencia característica del acero (f_{yk} deberá ser el mayor de f_{sk} y f_y).
 $0.40f_{yk} \leq 140 \text{ Mpa}$.
- F_1 = Factor de mayoración de cargas. Este coeficiente se lo puede obtener del **cuadro 3.5**.

3.3.4 Resistencia estructural a flexión y cortante.

Resistencia estructural a flexión.

Cuando se desee calcular la resistencia estructural a flexión, se supondrá que únicamente trabajará la estructura tubular del elemento. Así como también se tendrá en cuenta la resistencia estructural de la unión de la armadura, puesto que esta podría ser inferior a la de toda la estructura si la hubiera.

Se calculará en base a lo especificado según la guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (MFOM)³, y se tendrá en cuenta como comprobación que:



$$Q_{flexión} \geq M$$

Donde:

M = Momento flector.

$Q_{flexión}$ = Momento máximo que resiste la sección a flexión, que se determinará como sigue:

$$Si \Rightarrow \frac{d_e - 2 \cdot r_e}{t - r_e} \leq \frac{16450}{f_y}, \quad Q_{flexión} = W_{pl} \frac{f_y}{\gamma_a} \cdot F_{u,f}$$

$$Si \Rightarrow \frac{16450}{f_y} < \frac{d_e - 2 \cdot r_e}{t - r_e} \leq \frac{21150}{f_y}, \quad Q_{flexión} = W_{el} \frac{f_y}{\gamma_a} \cdot F_{u,f}$$

Donde:

d_e = Diámetro exterior nominal de la armadura tubular.

r_e = Reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión, que puede obtenerse del **cuadro 3.8**.

t = Espesor de la armadura tubular.

f_y = Límite elástico del acero de la armadura tubular que puede obtenerse del **cuadro 3.7**. Si se dispone de esa clasificación, de lo contrario se escogerá los valores que se dispongan en el mercado para el tipo de acero.

γ_a = Coeficiente parcial de seguridad para el acero de la armadura tubular $\gamma_a = 1.10$ (MFOM)³.

W_{pl} = Módulo plástico de la sección

W_{el} = Módulo elástico de la sección

$$W_{pl} = \frac{(d_e - 2 \cdot r_e)^3 - d_j^3}{6}$$

$$W_{el} = \frac{\pi [(d_e - 2 \cdot r_e)^4 - d_j^4]}{32(d_e - 2 \cdot r_e)}$$

Donde:

d_j = Diámetro interior nominal de la armadura tubular.

$F_{u,f}$ = Coeficiente de minoración del módulo resistente de la armadura tubular $F_{u,f} = 0.5$ (MFOM)³.

Módulo plástico: Es el módulo resistente a flexión de la sección transversal cuando ella se encuentra totalmente plastificada. Es el momento estático con respecto al eje neutro de las áreas de la sección transversal ubicadas a ambos lados del eje neutro.



Momento elástico: Es el momento para el cual la fibra más alejada del eje neutro alcanza la tensión de fluencia.

Resistencia estructural a cortante.

De igual manera como ya se visto en la resistencia estructural a flexión, en este caso, se considerará la actuación directa de la armadura tubular, comprobándose así el cálculo que se describe a continuación:

$$V \leq Q_{\text{cortante}}$$

Donde:

- V = Esfuerzo cortante.
- Q_{cortante} = Resistencia última de la sección a cortante. $Q_{\text{cortante}} = V_p$
 V_p = Resistencia plástica de la sección a esfuerzo cortante:

$$V_p = \frac{2 \cdot A_{Pr}}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_y}{\gamma_a}$$

Donde:

- f_y = Límite elástico del acero de la armadura tubular que puede obtenerse del **cuadro 3.7**. Si se dispone de esa clasificación, de lo contrario se escogerá los valores que se dispongan en el mercado para el tipo de acero.
- γ_a = Coeficiente parcial de seguridad para el acero de la armadura tubular $\gamma_a = 1.10$ (MFOM)³.
- A_{Pr} = Sección reducida de la armadura tubular de acero:

$$A_{Pr} = \frac{\pi}{4} \left[(d_e - 2 \cdot r_e)^2 - d_j^2 \right]$$

Resistencia estructural frente a esfuerzos combinados (flexión y cortante).

Cuando se requiera realizar el cálculo de la resistencia estructural en donde los esfuerzos a flexión y cortante interactúan simultáneamente, hay que tener en cuenta que la resistencia estructural se reduce. Cuando el valor del esfuerzo cortante es muy reducido, este se compensa por el endurecimiento del material por deformación y se puede despreciar. Aun así, cuando el esfuerzo cortante sea mayor que la mitad de la resistencia plástica a esfuerzo cortante, entonces se considera su efecto en el valor de la resistencia de cálculo a flexión y se comprobará lo siguiente (MFOM)³:

$$Si \Rightarrow V \leq 0.5 \cdot Q_{\text{cortante}}, \quad Q_{\text{Vflexión}} = Q_{\text{flexión}}$$



$$Si \Rightarrow V > 0.5 \cdot Q_{\text{cortante}}, \quad Q_{\text{flexión}} = (1 - \rho) \cdot Q_{\text{flexión}}$$

Donde:

- $Q_{\text{flexión}}$ = Momento máximo que soporta la sección a flexión, teniendo en cuenta la interacción del esfuerzo cortante.
- $Q_{\text{flexión}}$ = Momento máximo que resiste la sección a flexión, véase enunciado **3.3.4.**
- ρ = Factor de reducción:

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot V}{V_p} - 1 \right)^2$$

Donde:

- V = Esfuerzo cortante.
- V_p = Resistencia plástica de la sección a esfuerzo cortante.

3.4 ASENTAMIENTO DE LOS MICROPILOTES

3.4.1 Consideraciones generales.

El desplazamiento vertical o asentamiento se produce cuando la carga aplicada sobre el micropilote sobrepasa la máxima resistencia de soporte del suelo produciendo un fallo en el mismo, causando que el elemento se asiente con desplazamientos verticales ya sean considerables o no en profundidad. El asiento depende principalmente de las características que tenga el terreno.

Según la *GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA; 2005, (MFOM)³* se considera suelo granular cuando el material que pasa por el tamiz # 0.080 mm < 15%, y suelo cohesivo cuando el material que pasa por el tamiz # 0.080 mm > 35%.

Por otra parte cuando se efectúen cimentaciones ya sea de nueva construcción o recalces, y a su vez los micropilotes atraviesen suelos granulares y cohesivos, se considerará el estudio para los niveles de suelo más desfavorables, por lo que siempre es preferible tomar en cuenta los suelos cohesivos de consistencia muy firme a dura ($q_u > 0.35 \text{ MPa}$), y suelos granulares de compacidad media a densa y muy densa ($N > 20$) (MFOM)³.

Si es el caso en donde no se tiene la veracidad de que un terreno es más deformable que el otro, entonces se podría considerar el cálculo para cada uno de los niveles de suelo diferente (capas), y el asiento total se apreciará como la media ponderada de dichos asientos.



El cálculo del asentamiento de micropilotes se realizará en base a lo descrito por la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carreteras (MFOM)³, y en la cual se puede obtener más información sobre este proceso de diseño.

3.4.2 Micropilotes en suelos granulares.

En terrenos granulares el asiento se calculará con la siguiente expresión:

$$S_{NG} = \left(\frac{9Pc}{Qu} - 2 \right) \cdot \frac{D}{90}$$

Donde:

- S_{NG}** = Asiento del micropilote en terreno granular.
- Pc** = Carga axial a compresión.
- Qu** = Resistencia última frente al hundimiento.
- D** = Diámetro nominal del micropilote.

3.4.3 Micropilotes en suelos cohesivos.

En terrenos cohesivos el asiento se calculará con la siguiente expresión:

$$S_{NC} = \frac{0.6 \cdot Pc}{L \cdot q_c}$$

Donde:

- S_{NC}** = Asiento del micropilote en terreno cohesivo.
- Pc** = Carga axial a compresión.
- L** = Longitud del micropilote.
- q_c** = Resistencia unitaria del terreno a la penetración estática (resistencia unitaria por punta al avance del cono). Se determinará preferiblemente a partir del ensayo de penetración con el cono CPT, según UNE 103804, o con la ecuación referida en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera, epígrafe 3.4.1.2.c*

$$q_c = (C \cdot N_k) + \sigma'_v$$

- C** = Cohesión del suelo.
- N_k** = Factor a dimensional de proporcionalidad. Depende del tipo de terreno, profundidad y otros factores, (de 5 a 20), por lo general $N_k=15$ (*Guía de cimentaciones en obras de carreteras, epígrafe 3.4.1.2*)
- σ'_v** = Presión vertical total a nivel del ensayo. *Ec. 3.5.2.2(a),(b)*

3.5 ANÁLISIS Y DISEÑO DE MICROPILOTES EN GRUPO

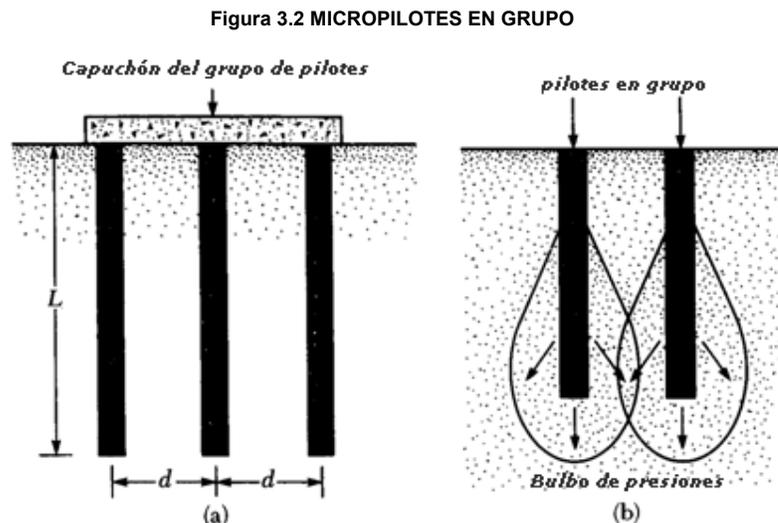
El cálculo se lo realizará de acuerdo a la metodología utilizada por BRAJA M. DAS⁵, Principios de Ingeniería de Cimentaciones” tomando como resistencia ultima del pilote individual el calculado por la metodología empleada por la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (MFOM)³.

3.5.1 Grupo de micropilotes

Se llama grupo de micropilotes a un conjunto de micropilotes verticales al que se pueden añadir en ciertos casos micropilotes inclinados, por lo general simétricos, sin cabeza libre y sujetos en sus cabezas por una capa de hormigón de espesor variable llamado **encepado** para resistir esfuerzos mucho mayores que los que resistiría normalmente una solo micropilote. (Fig. 3.2.a).

Hay que tener en cuenta que cuando los micropilotes se colocan en grupo, la distancia que hay entre ellos no sea demasíadamente corta ni larga ya que esto puede ocasionar que los bulbos de presiones se intersequen reduciendo así la capacidad de carga de los micropilotes o a su vez que estos funcionen individualmente por estar muy espaciados, lo que causaría que los elementos colapsen por corte a asentamiento diferencial. (Fig.2.10.b).

En la práctica, el espaciamiento d mínimo centro a centro es de $2.5D$ ($D = \text{diámetro}$) y en situaciones ordinarias, es aproximadamente de 3 a $3.5D$, (Braja M. Das)⁵.



Fuente: BRAJA M. DAS, Principios de Ingeniería de Cimentaciones

Según la “GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA” (MFOM)³, indica que el efecto de grupo parece ser óptimo para valores del espaciamiento centro a centro de micropilotes comprendidos entre



2.5D a 4D, para valores inferiores el confinamiento puede llegar a ocasionar una ruptura en el elementos suelo – micropilotes, disminuyendo así la resistencia total.

Por no haber estudios más recientes referentes a micropilotes y dado que los pocos procedimientos no son del todo acertados. Los cálculos para estimar las diferentes resistencias de los micropilotes en grupo en diferentes ámbitos de estudio, son efectuados por los mismos procedimientos utilizados en pilotes, y que en ocasiones se utilizan factores de mayoración o de seguridad.

3.5.1.1 Eficiencia de grupo.

La eficiencia de grupo principalmente da la pauta para analizar el comportamiento del grupo de micropilotes en comparación del micropilote aislado, es decir si este se comportará como un conjunto en si o se considerará que trabajara individualmente.

La ecuación para la eficiencia de grupo es la siguiente (*Braja M. Das*)⁵:

$$\eta = \frac{Qg}{Qu}$$

Donde:

- η = Eficiencia de Grupo (se lo representará en %)
- Qg = Resistencia última frente al hundimiento en grupo.
- Qu = Resistencia última frente al hundimiento.

Si no se posee Qg , entonces se procede a ocupar cualquiera de las siguientes fórmulas:

Grupo de los Ángeles (ESPAÑA) (*José M^a. Rodriguez Ortiz*)¹³.

Donde

- m = Número de micropilotes por fila.
- n = Número de micropilotes por columna.
- D = Diámetro del micropilote.
- s = Distancia centro a centro entre micropilote



Grupo de los Ángeles (Braja M. Das)⁴

Donde

- m*** = Número de micropilotes por fila.
- n*** = Número de micropilotes por columna.
- D*** = Diámetro del micropilote.
- s*** = Distancia centro a centro entre micropilote

Converse-Labarre (Braja M. Das)⁴

Donde

- M*** = Número de micropilotes por fila.
- N*** = Número de micropilotes por columna.
- D*** = Diámetro del micropilote.
- S*** = Distancia centro a centro entre micropilote

3.5.1.2 Comprobación frente al hundimiento.

Los cálculos que se deben realizar para comprobar la resistencia por hundimiento en grupo de micropilotes son los mismos que los efectuados para un solo micropilote visto en el **apartado 3**.

Para poder calcular la resistencia al hundimiento de todo el grupo se efectúan las ecuaciones que se encuentran a continuación (Braja M. Das)⁴:

Cuando $\eta \geq 1$

$$Q_g = \sum Q_u$$

Cuando $\eta < 1$

$$Q_g = \eta \cdot \sum Q_u$$

Y debe comprobarse que:

$$Q_g \geq P_c$$

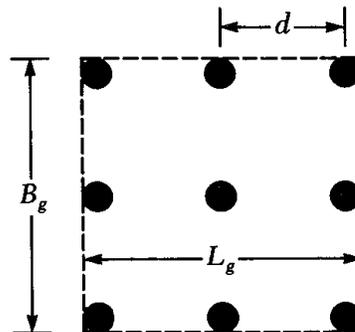
3.5.1.3 Asentamiento en grupo de micropilotes.

El cálculo del asentamiento de grupo de micropilotes se lo efectúa con el mismo procedimiento con el que se diseña los pilotes en base a la Guía de cimentaciones en obras de carreteras (*Dirección General de Carreteras*)⁷. El asiento depende principalmente de la carga impuesta al grupo, de la geometría del micropilote y del suelo en el que los elementos están inmersos, así como la deformabilidad local y general del terreno en la zona de apoyo.

El grupo de micropilotes puede quedar representado por: número de micropilotes por fila (m), número de micropilotes por columna (n), distancia centro a centro del micropilote (s). Y la longitud L_g y ancho B_g sería: (Fig. 3.3).

Según la Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras indica que el asiento del grupo es similar al de las cimentaciones superficiales equivalentes, en donde el plano de apoyo se considera ubicado en las puntas del elemento en sí y con dimensiones mayores a las del grupo, justamente para tener en cuenta el reparto de presiones que están siendo transmitidas por el fuste.

Figura 3.3 MICROPILOTES EN GRUPO (Vista en Planta)



Fuente: BRAJA M. DAS, Principios de Ingeniería de Cimentaciones

$$L_g = (m - 1)s + D \quad \text{Ec.3.35}$$

$$B_g = (n - 1)s + D \quad \text{Ec.3.36}$$

Según lo descrito en el párrafo anterior, se podrá calcular el asiento total del grupo con la siguiente ecuación (*Dirección General de Carreteras*)⁷:

$$S_g = S_o + 0.8 \frac{Q_g (1 - V_{equiva}^2)}{E_m (B_g + H_1)(L_g + H_1)} \quad \text{Ec.3.37}$$



Donde:

- S_g = Asiento del grupo.
 S_o = Asiento del micropilote aislado. Se utilizará una carga total a compresión igual a: Pc dividida para el número total de micropilotes que conforman el grupo.
 Q_g = Carga axial aplicada al grupo de micropilotes.
 B_g = Base del encepado Ec 3.35.
 L_g = Longitud del encepado Ec 3.36.
 H_1 = $1/3L$
 V_{equiva} = Módulo de Poisson equivalente.
 E_m = Módulo de elasticidad equivalente del suelo.

$$V_{equiva} = \frac{\sum v_i \cdot z_i \cdot \Delta\sigma'_{vi}}{\sum z_i \cdot \Delta\sigma'_{vi}}$$

Donde:

- v_i = Módulo del Poisson del terreno en cuestión.
Los módulos de Poisson para algunos tipos de suelo se pueden apreciar en el cuadro 3.13 (AASHTO, 2004)¹².
 z_i = Espesor de cada estrato.
 $\Delta\sigma'_{vi}$ = Incremento de la presión vertical total, en el centro del estrato i, en la vertical del centro de la cimentación.

Para cuando la cimentación sea corta, $L_g/B_g \leq 10$:

$$\Delta\sigma'_{vi} = p \cdot (1 - \cos^3 \alpha)$$

Para cuando la cimentación sea demasiado larga $L_g/B_g \geq 10$:

$$\Delta\sigma'_{vi} = p \cdot \frac{2\varepsilon + \text{sen}2\varepsilon}{\pi}$$

Donde:

- p = Presión media transmitida por la cimentación.
 α = $\text{arctg}(a/H)$, expresado en radianes.
 a = Radio de la cimentación circular equivalente
 $a = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$
 A = Área de apoyo de la cimentación.
 H = Profundidad del punto en cuestión, bajo el plano de apoyo del cimienta.
 ε = $\text{arctg}(B/2H)$, expresado en radianes.
 B_g = Ancho del encepado.



E_m = Módulo de elasticidad equivalente del suelo.

$$E_m = \frac{\sum \Delta \sigma_i \cdot z_i}{\sum \left(\frac{\Delta \sigma_i}{E_i} \right) \cdot z_i}$$

E_i = Módulo de elasticidad del terreno en cuestión.

Los módulos de elasticidad para algunos tipos de suelo se pueden apreciar en el **cuadro 3.13** (AASHTO, 2004)¹².

Cuadro 3.13 CONSTANTES ELÁSTICAS DE DIFERENTES SUELOS MODIFICADAS DE ACUERDO CON EL U.S. DEPARTMENT OF THE NAVY (1982) Y BOWLES (1988).

TIPO DE SUELO	Rango de valores típicos	Coeficiente de Poisson, ν (adimensional)	Estimación de E_s a partir de N	
	Módulo de Young, E_s (MPa)		Tipo de suelo	E_s (MPa)
Arcilla:				
Blanda sensible	2.4 - 15	0.4 - 0.5 (no drenada)	Limos, limos arenosos, mezclas levemente cohesivas.	0.4 N1
Medianamente rígida a rígida	15 - 50		Arenas limpias finas a medias y arenas levemente limosas.	0.7 N1
Muy rígida	50 - 100		Arenas gruesas y arenas con poca grava.	1.0 N1
			grava arenosa y gravas.	1.1 N1
Loes	15 - 60	0.1 - 0.3	grava arenosa y gravas	1.1 N1
Limo	2 - 20	0.3 - 0.35		
Arena fina:			Estimación de E_s a partir de S_u	
Suelta	7.5 - 10	0.25	Arcilla blanda sensible.	400 S_u - 1000 S_u
Medianamente densa	10 - 20			
Densa	20 - 25			
Arena:			Arcilla medianamente rígida a rígida. Arcilla muy rígida.	1500 S_u - 2400 S_u 3000 S_u - 4000 S_u
Suelta	10 - 25	0.20 - 0.35		
Medianamente densa	25 - 50	0.30 - 0.40		
Densa	50 - 75			
Grava:			Estimación de E_s a partir de q_c	
Suelta	25 - 75	0.20 - 0.35	Suelos arenosos.	4 q_c
Medianamente densa	75 - 100	0.30 - 0.40		
Densa	100 - 200			

Fuente: ESPECIFICACIONES AASHTO PARA EL DISEÑO DE PUENTES POR EL MÉTODO LRFD



3.6 COMPROBACIÓN FRENTE A SOLICITACIONES TRANSVERSALES.

Los micropilotes pueden estar sometidos a esfuerzos horizontales provocados por el viento, por efectos sísmicos, empuje de un puente grúa, sobrecargas ejercidas por el terreno que empuja a los micropilotes en taludes etc.

El cálculo tanto de pilotes como micropilotes frente a esfuerzos horizontales, tan solo debe realizarse en aquellos casos en que la máxima componente de los empujes horizontales sea superior al 10% de la carga vertical que está actuando sobre el o los elementos (grupo de micropilotes). (*Documento Básico SE-C*)⁸.

De ser así se procederá a realizar el cálculo mediante diferentes métodos tales como el propuesto por Broms y mediante el método de matriz de rigidez que serán descritos en esta tesis como una referencia, ayuda o alternativa en el caso de que no se desee calcular por el método de curvas p-y que es con el que está realizada la herramienta de diseño presentada en este documento.

3.6.1 Método de Broms

Este método tiene una limitación ya que solo es utilizado para suelos que presenten una característica homogénea, es decir solo es aplicable a arcillas o arenas dejando de lado a suelos heterogéneos o que presenten una combinación de arcilla y arena. Los métodos que si toman suelos heterogéneos son el de la matriz de rigidez y el de curvas p-y que se lo estudia más adelante.

Naturalmente esta es la desventaja que podría generar el método descrito por Broms, esto da lugar a dejar de lado este cálculo y plantear otro que este acorde con la situación que generalmente se presenta en nuestro entorno. Por otra parte una de las ventajas es que puede usarse para calcular de una manera eficaz pilotes cortos, largos y muy largos, presentando así la ruptura o fallo que podría presentar el elemento frente a una carga lateral (*Ing. Marco Antonio Boidi*)¹⁵.

Este método propuesto por Broms (*Manjriker Gunaratne*)⁹ se basa principalmente en determinar la cantidad de esfuerzo producido por el suelo hacia el elemento, en este caso el micropilote y cuanto puede resistir el mismo antes de que falle por completo y se produzcan desplazamientos mayores que pondrían en riesgo a la estructura que están soportando.

Broms considera para el cálculo suelos puramente cohesivos o suelos puramente granulares, y los resultados son usados para estimaciones preliminares.

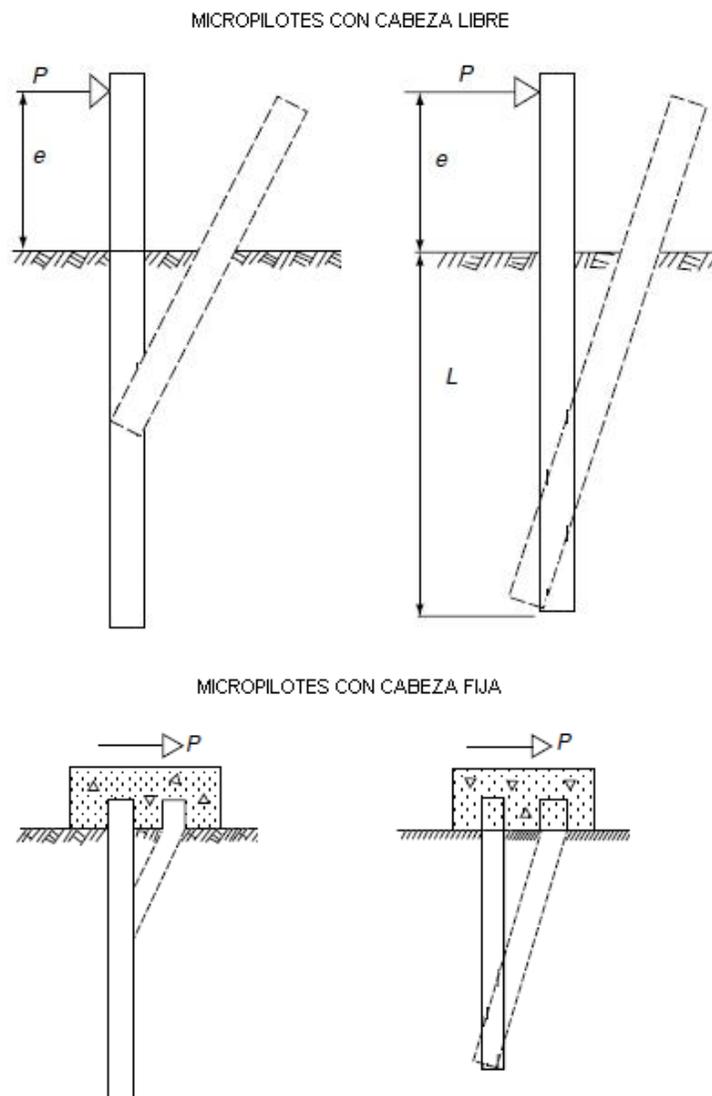
La carga máxima horizontal que puede aplicarse a un micropilote depende especialmente de los siguientes factores (*Fig. 3.4*) (*Manjriker Gunaratne*)⁹.

- Si el micropilote es de cabeza fija o libre; por lo general los micropilotes no son utilizados como elementos de cabeza libre debido a su estructura, por su diámetro y longitud teniendo poca resistencia a cargas laterales. Sin embargo los

micropilotes con cabeza fija poseen mayor resistencia que los de cabeza libre, por el hecho de estar en contacto con el terreno circundante.

- Si los elementos son considerados como largos o cortos; entonces, si el material del micropilote falla antes que el suelo que lo rodea, se lo considerará como micropilote largo. De igual manera si el suelo no soporta la carga ejercida hacia el micropilote este se desplazará sin fracturarse, entonces se considerará como micropilote corto.

Figura 3.4 CARGAS LATERALES ACTUANTES EN UN MICROPILOTE



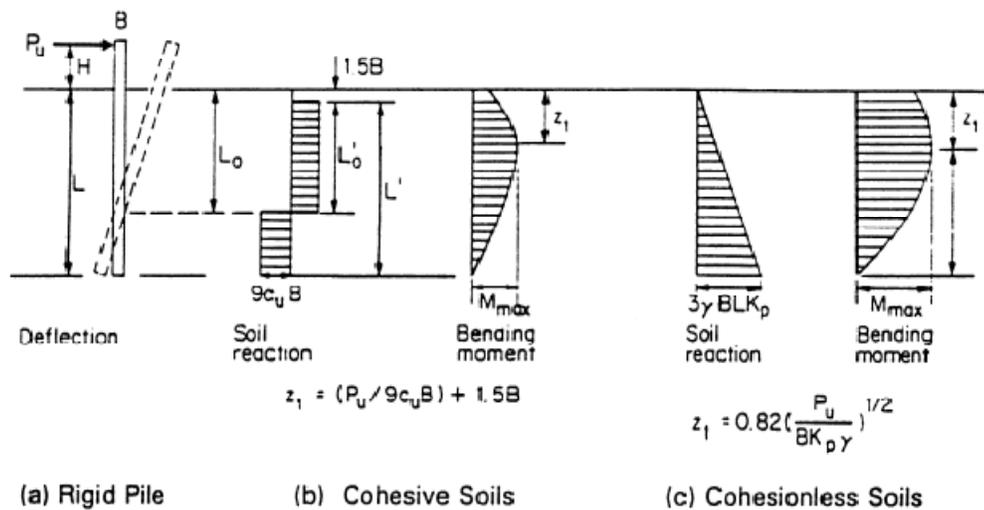
Fuente: Manjriker Gunaratne, THE FOUNDATION ENGINEERING HANDBOOK, 2006.

Existen dos formas de cálculo para obtener la carga lateral última, una de ellas es por ecuaciones empíricas (Fig 3.5 y 3.6) o directamente con los ábacos de *BROMS* que se los puede visualizar en la figura 3.7 (a) y 3.7 (b) (Manjriker Gunaratne)⁹.

Micropilotes con cabeza libre.

La capacidad lateral última de un pilote rígido P_u bajo condiciones de cabeza libre se puede estimar mediante las siguientes fórmulas.

Figura 3.5 MICROPILOTE EN CONDICIONES DE CABEZA LIBRE



Fuente: *Dridge Engineering Handbook, DEEP FOUNDATIONS.*

Suelos cohesivos

$$P_u = \left(\frac{L'_0 - 2 \cdot L \cdot L'_0 + 0.5 \cdot L'^2}{L + H + 1.5B} \right) (9 \cdot c_u \cdot B)$$

Suelos granulares

$$P_u = \frac{0.5 \cdot L^3 \cdot K_p \cdot \gamma'}{H + L}$$

Donde:

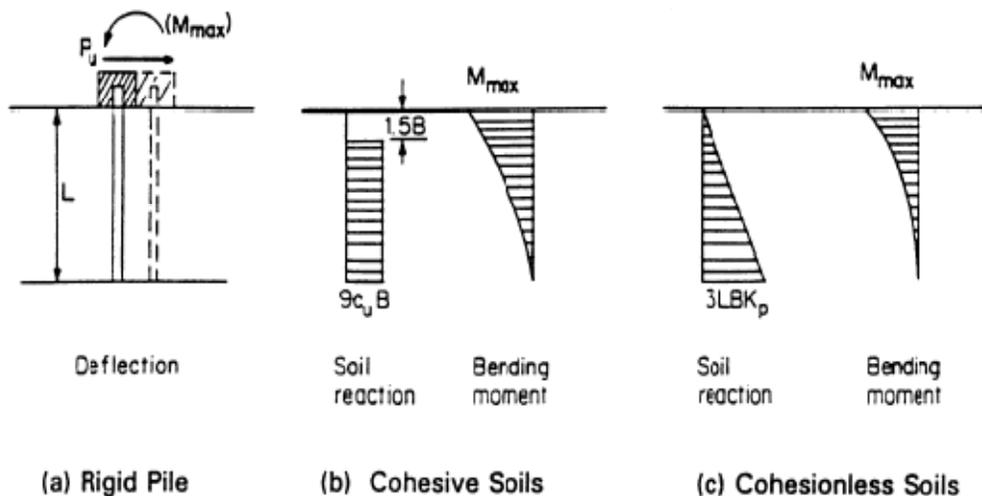
- P_u = Capacidad lateral última.
- L = Longitud enterrada del micropilote.
- H = Distancia a la que se encuentra aplicada la carga lateral.
- B = Diámetro del micropilote.

- L' = Longitud empotrada del micropilote descontando $1.5B$ desde la superficie del terreno: $L' = L - 1.5B$
- L_0 = Distancia al centro de rotación del micropilote:
 $L_0 = (H+23L)/(2H+L)$
- L'_0 = Distancia desde el centro de rotación hasta $1.5B$ de longitud de la superficie:
 $L'_0 = L_0 - 1.5B$
- c_u = Cohesión del suelo.
- K_p = Coeficiente de empuje pasivo, ϕ ángulo de fricción del suelo:
 $k_p = \text{tg}^2(45^\circ + \phi/2)$
- γ' = Peso específico del suelo.

Micropilotes con cabeza empotrada.

La capacidad lateral última de un pilote rígido P_u bajo condiciones de cabeza empotrada se puede estimar mediante las siguientes fórmulas.

Figura 3.6 MICROPILOTE EN CONDICIONES DE CABEZA LIBRE



Fuente: *Dridge Engineering Handbook, DEEP FOUNDATIONS.*

Suelos cohesivos

$$P_u = 9 \cdot c_u \cdot B \cdot (L - 1.5 \cdot B)$$

Suelos granulares

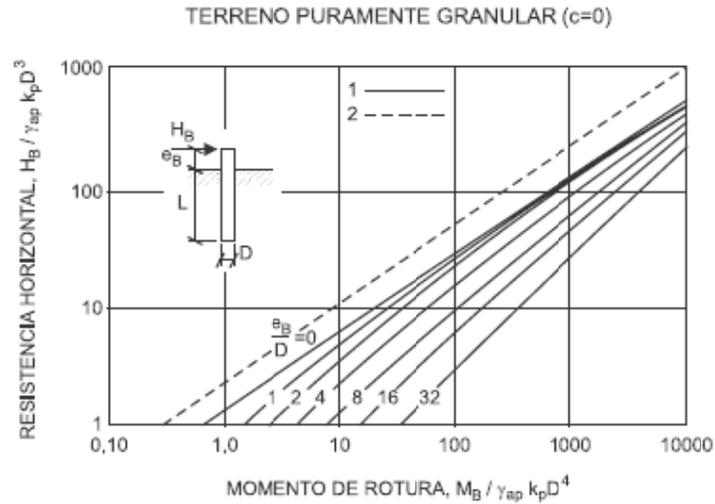
$$P_u = 1.5 \cdot \gamma' \cdot B \cdot L^2 \cdot K_p$$

Donde:

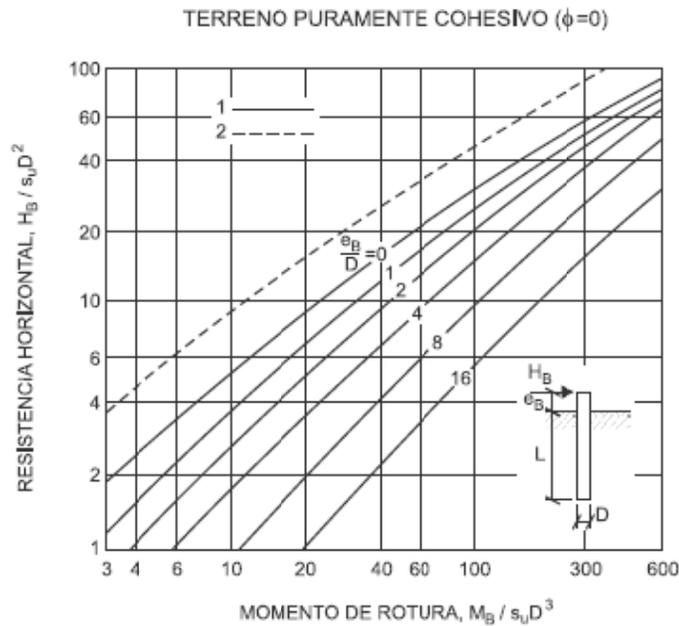
- P_u = Capacidad lateral última.
 L = Longitud enterrada del micropilote.

- B** = Diámetro del micropilote.
- c_u** = Cohesión del suelo.
- K_p** = Coeficiente de empuje pasivo, ϕ ángulo de fricción del suelo:
 $k_p = \text{tg}^2(45^\circ + \phi/2)$
- γ'** = Peso específico del suelo.

Figura 3.7 CARGAS LATERALES ACTUANTES EN UN MICROPILOTE



(a)



(b)

Fuente: GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA (Octubre 2005).



Donde:

H_B = Capacidad lateral última.

M_B = Momento que provoca la rotura del micropilote $M_B = Q_{flexión}$.

D = Diámetro del micropilote.

S_u = Resistencia al corte sin drenaje del terreno.

K_p = Coeficiente de empuje pasivo, ϕ ángulo de fricción del suelo:
 $k_p = tg^2(45^\circ + \phi/2)$

γ' = Peso específico del suelo.

3.6.2 Método de la matriz de rigidez

Este método también conocido con el nombre de “método de elementos finitos” es muy eficaz ya que divide al elemento en varias partes y trata al suelo de una forma elástica generando resortes que son las reacciones del suelo (*Manjriker Gunaratne*)⁹, muy parecido al método de curvas p - y que también modela al suelo mediante una serie de resortes a lo largo del elemento (*Bridge Engineering Handbook*)¹⁰. Aun así es muy extenso su cálculo ya que dependiendo del número de divisiones se generan las matrices de rigidez, pero todo esto se podría mejorar mediante la utilización de un programa de cómputo.

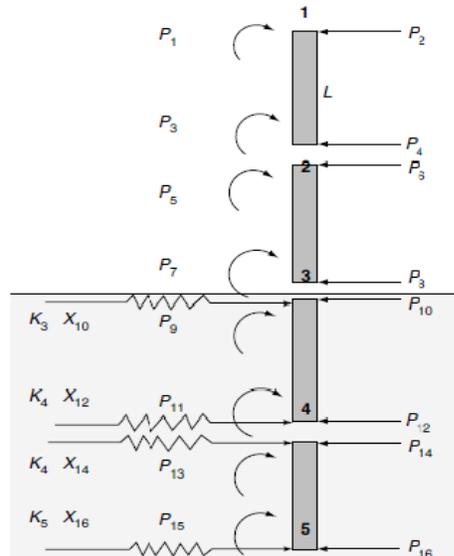
Se puede obtener más información en *The Foundation Engineering Handbook* (*Manjriker Gunaratne*)⁹.

El elemento es considerado como una viga, por lo que se utiliza el mismo procedimiento del método de la matriz de rigidez (modelo matemático de elementos estructurales finitos, cuyas propiedades pueden expresarse en forma matricial), que tiene como finalidad mediante el módulo de elasticidad del material y el momento de inercia calcular el desplazamiento que tendría el pilote frente a los esfuerzos horizontales que se le podría aplicar.

En un sentido más concreto, el pilote se divide en varias partes unidimensionales, en este caso se dividirá al elemento de acuerdo a los estratos en el que este inmerso.

El elemento tendrá por tanto en cada división un nudo y en cada nudo una fuerza y un momento, esto en su longitud libre, y en su longitud enterrada se adiciona el esfuerzo producido por el suelo. (*Fig 3.8*).

Figura 3.8 DIVISIÓN DEL ELEMENTO EN VARIAS PARTES (Método de la matriz de rigidez)



Fuente: Manjriker Gunaratne, THE FOUNDATION ENGINEERING HANDBOOK, 2006.

Donde:

- P_i (*i* impar) = Momentos internos en los nudos de la pila.
- X_i (*i* par) = Desviación nodal de cada elemento de la pila.
- X_i (*i* impar) = Rotación nodal de cada elemento de la pila.
- K_j = Resistencia lateral del suelo representado por resorte de rigidez equivalente.

Basado en el análisis estructural, se puede escribir la relación de rigidez para cada elemento de la pila como sigue (Manjriker Gunaratne)⁹:

T

=

Donde EI es la rigidez de la pila y L la longitud de cada elemento de la pila.

Para este método se asumirá la pila como una viga en una cimentación elástica, así el módulo de reacción lateral del subsuelo kh a cualquier profundidad puede relacionarse con el desplazamiento lateral de la pila a esa profundidad.

Por lo tanto la rigidez de los resortes puede expresarse apropiadamente como K_j ya que está relacionado directamente con el módulo de reacción lateral del subsuelo kh .



Para obtener estos valores se debe tomar en cuenta los dos niveles de la pila, es decir para nudos que se encuentren en la superficie y para los que estén dentro del terreno (Manjriker Gunaratne)⁹:

Para nudos que se encuentren enterrados:

$$K_j = L \cdot B \cdot K_h$$

Para nudos que se encuentren en superficie:

$$K_j = 0.5 \cdot L \cdot B \cdot K_h$$

Donde **B** es el diámetro o base de la pila y **L** es la longitud del elemento finito.

En la Fig. 3.9 se puede visualizar el orden como se encontrarían cada uno de los valores de **K_j** y **K_h**.

Para poder estimar el módulo de reacción lateral del subsuelo **K_h**, BOWLES (Manjriker Gunaratne)⁹ propone la siguiente ecuación que será utilizada de acuerdo a los nudos y las profundidades que correspondan al sub elemento:

$$K_h = A_h + B_h \cdot Z^n$$

Donde **A_h** y **B_h** son calculados con las formulas que se indican a continuación:

$$B_h = F_{w2} \cdot C_m \cdot C \cdot \gamma \cdot N_q$$

Donde **Z** es la profundidad en donde se hará la evaluación **N_c**, **N_q** y **N_y** son factores de capacidad de carga propuestos por Terzaghi (Braja M. Das)⁵.

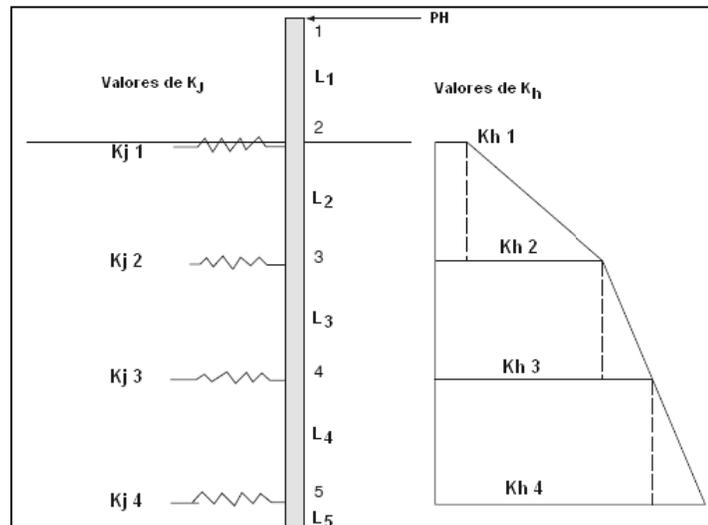
Bowles (Manjriker Gunaratne)⁹ propone las constantes para los siguientes valores:

$$\begin{aligned} C &\approx 40 \text{ en KN/m}^3 \\ C_m &= 1.5 - 2.0 \\ n &= 0.4 - 0.6 \end{aligned}$$

Para pilotes cuadrados y tipo **H** en suelos cohesivos: **F_{w1}**, **F_{w2}** = 1.0 (Manjriker Gunaratne)⁹.

Para pilotes circulares: **F_{w1}** = 1.3 - 1.7 y **F_{w2}** = 2.0 - 4.4 (Manjriker Gunaratne)⁹

Figura 3.9 VALORES DEL MÓDULO LATERAL DEL SUELO K_h Y DE LA RIGIDEZ DE LOS RESORTE K_j



Fuente: Manjriker Gunaratne, THE FOUNDATION ENGINEERING HANDBOOK, 2006.

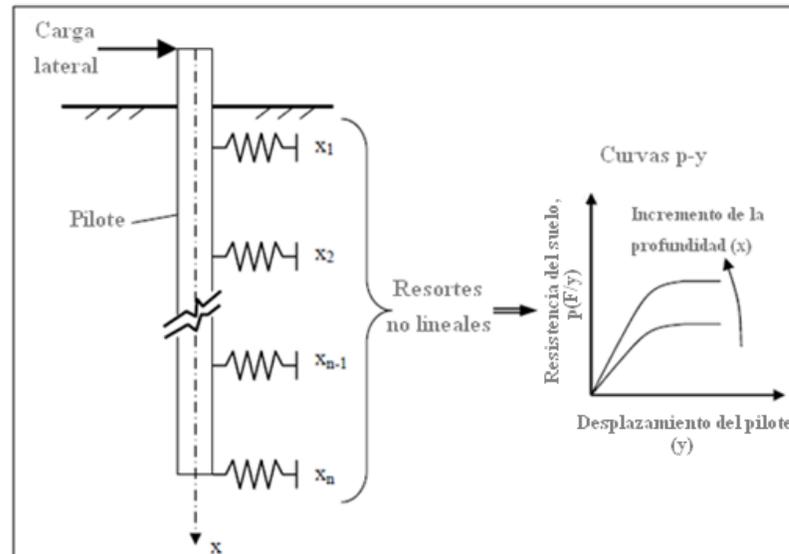
3.6.3 Método de análisis mediante curvas p-y

A continuación se detalla una breve información acerca del método y de las ecuaciones que utiliza para poder general las curvas p-y, esto servirá de guía para que el lector pueda saber de qué se trata este análisis que es con el que está realizada la herramienta de carga lateral; mas información se puede tomar de Bridge Engineering Handbook¹⁰, Manjriker Gunaratne⁹ y WA-RD 153.1¹⁴

Como este tipo de análisis es muy extenso para realizarlo a mano se necesita de una herramienta de programación, tal es el caso de OpenSees¹¹ el cual se detallará seguidamente luego de la revisión del método de curvas p-y

El método de análisis P-Y, es el más utilizado a la hora de comprobar la resistencia de un pilote sometido a carga horizontal, el cual considera las reacciones producidas por el suelo (resistencia unitaria del suelo representada por una serie de resortes laterales ubicados a lo largo de la estructura (Fig.3.10) frente a desplazamientos laterales no lineales basado en el modelo de WINKLER (Bridge Engineering Handbook)¹⁰ (Fig.3.30), todas las fórmulas de cálculo fueron desarrolladas experimentalmente a partir de ensayos de carga in situ, para lo cual se considera al elemento como una viga elástica que se apoya sobre un terreno deformable (medio elástico no lineal).

Figura 3.10 PILOTE CARGADO LATERALMENTE



Fuente: ANALYSES OF THE LATERAL LOAD TESTS AT THE ROUTE 351 BRIDGE

La metodología en si se basa en la curva que describe la rigidez de cada resorte no lineal en términos de la relación fuerza-desplazamiento (*Bridge Engineering Handbook*)¹⁰.

El método puede usarse para resolver problemas en donde la cimentación se encuentra en diferentes tipos de suelos, diferentes espesores y en donde existan suelos que tengan comportamientos no lineales; diferentes tipos de materiales con los que esté constituido el pilote, diferentes secciones y diferentes tipos de conexiones en su cabeza.

La ecuación básica para un pilote que se encuentra en un terreno deformable es la siguiente (*WA-RD 153.1*)¹⁴:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + P_x \frac{d^2 y}{dx^2} - p = 0$$

Donde:

- y = Desplazamiento lateral en un punto a lo largo del pilote.
- EI = Rigidez del pilote.
- P_x = Fuerza axial en el pilote.
- p = Reacción del suelo por unidad de longitud, y $p = -E_s y$, en donde E_s es la rigidez del suelo (o módulo secante de reacción) y el signo negativo denota la reacción de la fuerza en sentido opuesto a la deflexión de la pila.

La ecuación 3.44 relaciona las siguientes fórmulas, cuyo procedimiento de derivación se lo puede apreciar en (*WA-RD 153.1*)¹⁴:

$$M = EI \frac{d^2 y}{dx^2}$$

$$V = EI \frac{d^3 y}{dx^3}$$

$$\theta = \frac{dy}{dx}$$

Donde M es el momento de curvatura, V es el esfuerzo cortante y θ es la rotación del pilote.

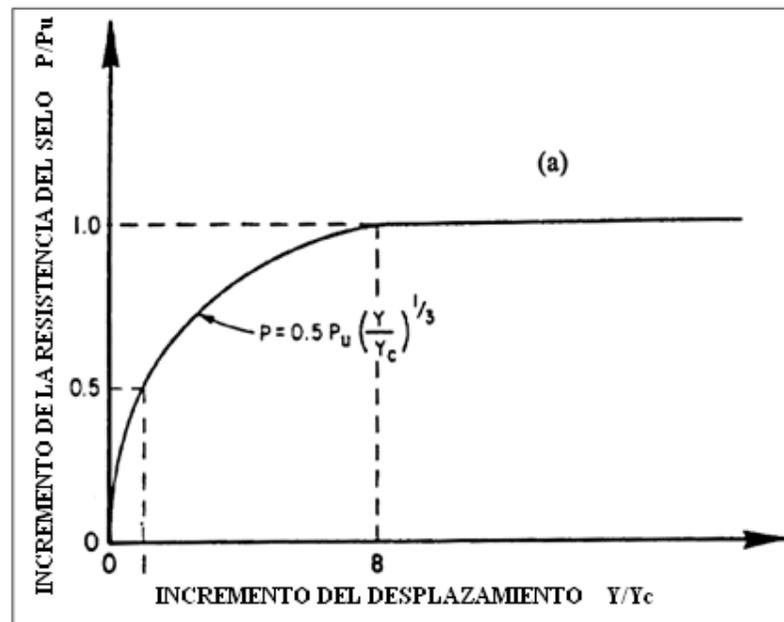
Generación de curvas P-Y.

Las fórmulas empíricas para generar las curvas P-Y son diferentes para cada tipo de suelo y dependen del diámetro del pilote, la rigidez del terreno, la presión de sobrecarga confinada y las condiciones de carga. Así mismo, si se trata de pilotes en grupo las curvas P-Y variarán de acuerdo al número y al espaciamiento entre pilotes.

Curvas P-Y en arcillas.

En arcillas Matlock (*Bridge Engineering Handbook*)¹⁰ propuso un método para calcular la reacción del suelo por unidad de longitud p como sigue: (Fig. 3.11).

Figura 3.11 CARACTERÍSTICAS DE LAS CURVAS P-Y PARA ARCILLA (MATLOCK)



Fuente: Development of P-Y curves for analysis of laterally loaded piles in Western Washington; WA-RD 153.1



Donde:

- p_u = Resistencia lateral última del suelo que corresponde al último esfuerzo cortante del suelo.
- y_c = Desplazamiento lateral del suelo que corresponde al 50% de la última resistencia lateral del mismo.
- Y = Desplazamiento lateral del suelo.

La resistencia lateral última del suelo p_u es calculada como:

Donde γ' es el peso específico, x es la profundidad a la cual se genera cada uno de los resortes, c es la cohesión de la arcilla, D es el diámetro de la pila, j es una constante tomada frecuentemente como 0.5 y x_r es la profundidad debajo de la superficie del lecho rocoso (*Bridge Engineering Handbook*)¹⁰.

$$y_c = 2.5 \cdot \varepsilon_{50} \cdot D$$

Donde y_c es el desplazamiento lateral del suelo correspondiente al 50% de la última resistencia lateral del terreno; ε_{50} es la resistencia al 50% del suelo que corresponde a la mitad del esfuerzo cortante no drenado (obtenido de ensayos triaxiales) (*Bridge Engineering Handbook*)¹⁰. En el **cuadro 3.14** se encuentran los valores para ε_{50} .

Cuadro 3.14 RESISTENCIA AL 50% DEL SUELO ε_{50}

Consistencia de la arcilla	Esfuerzo cortante no drenado C_u , KPa	ε_{50}
Suave	0 - 19.2	0.02
Media dura	19.2 - 48	0.01
Dura	48 - 96	0.007
Muy dura	96 - 192	0.005
Demasiado Dura	192 - 384	0.004

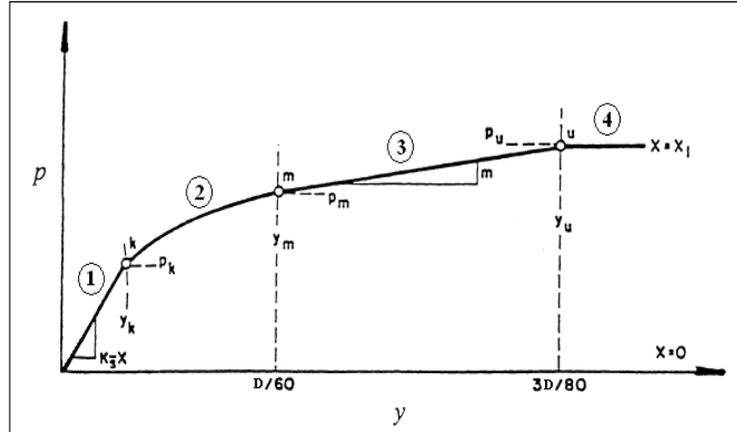
1 psf = 0.048 KPa

Fuente: *Bridge Engineering Handbook, DEEP FOUNDATIONS.*

Curvas P-Y en arenas.

Reese (*Bridge Engineering Handbook*)¹⁰ propone un método para calcular las curvas P-Y en suelos arenosos, en la cual indica que la curva que describe la resistencia del suelo versus desviación tiene un comportamiento bilineal (fig. 3.12).

Figura 3.12 CARACTERÍSTICAS DE LAS CURVAS P-Y PARA ARENAS (REESE)



Fuente: Development of P-Y curves for analysis of laterally loaded piles in Western Washington; WA-RD 153.1

Visualizando la *figura 3.12* las curvas consisten en un primer segmento inicial lineal **1**, en donde la resistencia unitaria del suelo es directamente proporcional al desplazamiento del pilote, un segundo segmento parabólico **2**, un tercero lineal de características similares al primero con pendiente positiva **3**, y un cuarto segmento llano **4**, en donde la reacción unitaria del suelo es la misma sin importar la desviación que se le siga incrementando, es decir en este último se podrá visualizar la resistencia última P_u .

El punto último, entre el segmento 3 y 4 en donde se genera P_u es el desplazamiento máximo con un valor $y_u = 3D/80$ y que de ahí en adelante P_u es el mismo, en donde D es el diámetro del pilote. A un desplazamiento $y_m = D/60$, la resistencia unitaria del suelo P_m es igual a un fragmento empíricamente determinado de la última resistencia del suelo (*Bridge Engineering Handbook*)¹⁰. La pendiente del primer segmento lineal describe el esfuerzo del suelo en ese instante.

El desplazamiento y_k se da de la siguiente manera:

$$y_k = \left[\frac{P_m / y_m}{(k \cdot x)^n} \right]^{1/(n-1)}$$

Donde k (*Manjriker Gunaratne*)⁹ es un parámetro a ser determinado basado en la densidad relativa del suelo y es diferente si el terreno se encuentra por debajo o por arriba del nivel freático (**Cuadro 3.15**).



Cuadro 3.15 VALORES REPRESENTATIVOS DE K

Ángulo de fricción	29° - 30°	30° - 36°	30° - 40°
Tipo de suelo a considerar	Suelto	Medio denso	Denso
Arriba	20 pci	60 pci	125 pci
Abajo	25 pci	90 pci	225 pci

1 pci = 272 kPa/m

Fuente: Manjriker Gunaratne, THE FOUNDATION ENGINEERING HANDBOOK, 2006.

$P_k=(kx)y_k$, y n es igual a:

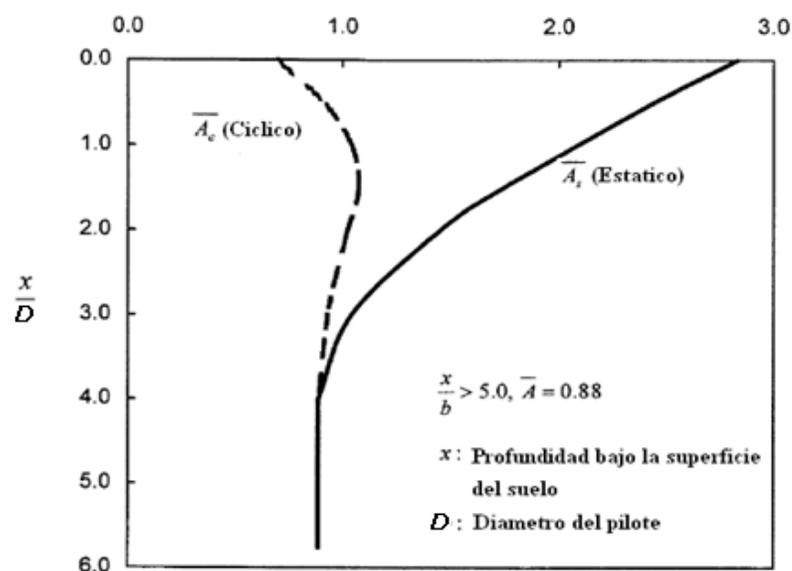
$$n = \frac{y_m}{p_m} \left(\frac{p_u - p_m}{y_u - y_m} \right)$$

$$p_m = B_s \cdot p_s$$

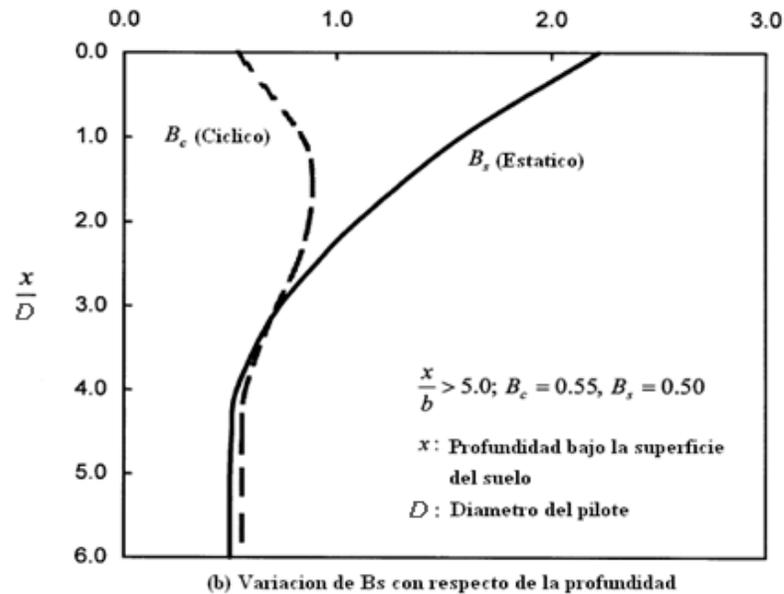
$$p_u = \bar{A}_s \cdot p_s$$

Donde \bar{A}_s y B_s son coeficientes obtenidos de gráficos provistos por Reese (Reese et al. 1974) (Manjriker Gunaratne)⁹ que dependen de las cargas estáticas o cíclicas. (Fig 3.13 a y b).

Figura 3.13 CARACTERÍSTICAS DE LAS CURVAS P-Y PARA ARENAS (REESE)



(a) Variación de A_s con respecto de la profundidad



Fuente: Manjriker Gunaratne, THE FOUNDATION ENGINEERING HANDBOOK, 2006.

P_s es igual al mínimo de P_{st} y P_{sd} .

Donde φ es el ángulo de inclinación del terreno si la cimentación no estuviese en un suelo claramente horizontal, θ es el ángulo de fricción del suelo, α es $\theta/2$, β es $45^\circ + \theta/2$, K_o es un coeficiente de presión de tierra que usualmente es de 0.4 y K_p es el coeficiente activo de la presión de tierra (*Bridge Engineering Handbook*)¹⁰.

Con esto se puede encontrar la resistencia p en cualquier segmento de la curva:

Segmento 1 lineal:

$$p = (kx)y$$



Segmento 2 parabólico:

$$p = p_m \left(\frac{y}{y_m} \right)^n$$

Segmento 3 lineal:

$$p = p_m + \frac{p_u - p_m}{y_u - y_m} (y - y_m)$$

Segmento 4 lineal:

$$p = p_u$$

Opensees

*OpenSees*¹¹ es un sistema abierto para Simulación en Ingeniería Sísmica, es un software diseñado para simular la respuesta sísmica de estructuras y sistemas geotécnicos desarrollado por el Pacific Earthquake Research Center de la Universidad de California en Berkeley, USA.

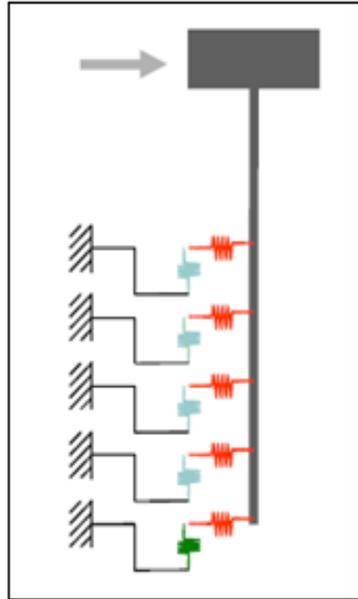
Si se desea encontrar información más detallada sobre Opensees se recomienda visitar (<http://peer.berkeley.edu/>)

Modelación de pilotes:

El modelo en *OpenSees* se basa en elementos finitos, que se logra dividiendo a la pila en varios elementos tipo barra, a los cuales se les da las propiedades no lineales del material. Seguidamente a lo largo de la longitud de pila embebida en suelo se modelan resortes los cuales poseen un extremo empotrado y el otro conectado a la pila (*Fig. 3.14*), los cuales toman las propiedades del suelo, mediante el uso de elementos **py**.

En el proceso de análisis para el cálculo de pilotes sometidos a carga lateral *Opensees* genera 3 elementos, **Py**, **Tz** y **Qz** que corresponden a las características para modelar el suelo.

Figura 3.14 GENERACIÓN DE RESORTES



Fuente: UNIVERSITY OF WASHINGTON, SEATTLE.

Para que estos elementos puedan ser creados se necesita cierta información correspondiente a las características del suelo en donde estarán embebidos los pilotes.

Para los elementos **Py** se necesitará el diámetro del pilote, la cohesión en arcillas **C** o el ángulo de fricción en arenas ϕ , el peso específico γ , el desplazamiento al 50% de *pult* Y_{50} solamente en arcilla (cuadro 3.15) y una variable que establece la resistencia aerodinámica en un espacio movilizad **cd** que por lo general es 0.1 (OpenSees)¹¹. Para los elementos **Tz** se necesitará el perímetro de la sección, cohesión en arcillas **C** o el ángulo de fricción en arenas ϕ , el cual sirve para calcular el ángulo de fricción suelo-pilote δ que es igual a $2/3\phi$ y el factor **cd** (OpenSees)¹¹.

OpenSees genera las curvas *p-y*, *t-z* y *q-z* con diferentes métodos de acuerdo al tipo de suelo (OpenSees)¹¹:

Elementos Py: En Arcilla, las curvas *p-y* serán determinadas por la metodología utilizada por Matlock (1970); en arenas las curvas *p-y* serán calculadas por la metodología propuesta por API (1993).

Elementos Tz: En arcillas las curvas serán determinadas por la metodología utilizada por Reese y O'Neill (1987); para arenas las curvas serán determinadas por la metodología utilizada por Mosher (1984).

Elementos Qz: En arcillas las curvas serán determinadas por la metodología utilizada por Reese y O'Neill (1987); para arenas se utiliza la metodología de Vijayvergiya's (1977).



Analisis:

OpenSees tiene capacidades avanzadas para modelar y analizar respuestas de sistemas no lineales utilizando una amplia gama de modelos de materiales, elementos y soluciones algorítmicas. Entre los principales análisis tenemos (*OpenSees*)¹¹:

- Análisis no lineal estático (pushover)
- Análisis no lineal cíclico
- Análisis dinámico debido a una excitación sísmica, sinusoidal, entre otras.

Como parte final se procederá a detallar en breve los pasos a seguir en la ejecución de micropilotes en base a la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (*MFOM*)³.

3.7 SISTEMA DE EJECUCIÓN

La ejecución de un micropilote contempla los siguientes pasos básicos (*MFOM*)³ (Fig 3.15).

3.7.1 Perforación del terreno.

Esta es la primera etapa que se ejecuta antes de proceder a la instalación del micropilote, se las puede realizar por diversos métodos según sea el estrato a atravesar ya sea con taladros, rotoperforación con martillo en fondo, con taladros tipo hélice si se trata de terrenos blandos etc., en especial con métodos que afecten en lo menor posible las características del suelo.

Se puede hacer en seco o mediante la inclusión de agua según sea la estabilidad del suelo y se lo logra mediante circulación inversa, en algunos casos se introduce directamente la armadura según como se vaya avanzando con la perforación.

A medida que se va perforando se introduce una entubación para evitar que las paredes se disgreguen y permitir al taladro trabajar con mejores rendimientos; se puede omitir la entubación en suelos que presenten suelos firmes.

3.7.2 Limpieza de la perforación.

Se lava la perforación efectuada con agua o aire a presión, esto para conseguir mejores resultados al momento de introducir el acero e inyectar el mortero.

3.7.3 Colocación de la armadura.

En esta etapa se inserta el acero directamente en la perforación efectuada anteriormente con métodos sencillos propuestos por el constructor según sea el diseño de la armadura del micropilotes.



La armadura de un micropilote puede hacerse con barras, tubos o una combinación de ambas (véase figura 2.1). La armadura habitual es un tubo de acero que además sirve de entubación, y en su caso de guía de inyección.

Los tipos de acero a emplear dependen de las necesidades de resistencia (y de la forma de trabajo) del micropilote. Pueden usarse aceros de resistencia entre $f_{yk} = 250 \text{ MPa}$ y $f_{yk} = 800 \text{ MPa}$ aunque lo más normal es el uso de aceros de 560 MPa de límite elástico. (Antonio Ros Esteban)¹.

La colocación de la armadura permite aumentar la resistencia a flexión y corte en terrenos blandos, muy necesarios cuando los micropilotes no trabajan solamente a compresión.

3.7.4 Incorporación del mortero.

La incorporación del mortero se lo realiza a presión, este debe ser fluido con resistencias a los 28 días $f_{ck_{28}} \geq 25 \text{ MPa}$, a los 7 días $f_{ck_7} \geq$ que el 60% de la requerida a los 28 días ($f_{ck_7} \geq 0.6 * f_{ck_{28}}$) y relaciones $\text{agua/cemento} = 0.5$. El método de inyección del mortero varía según el tipo de micropilotes (MFOM)³. A medida que el mortero está siendo inyectado, el entubado se lo retira poco a poco según sea las fases de inyección, que por lo general deberían ser de al menos 2 en arenas poco fisuradas, 3 en suelos de compacidad media y 4 o más en suelos blandos.

Entre cada fase debe existir un intervalo de tiempo mínimo de 6 a 12 horas para permitir que la lechada alcance una primera resistencia. Los caudales máximos de inyección deberían ser (Bustamante, 1986), (Manuel Romana Ruiz)²:

0,3 a 0,6 m³/hora para suelos cohesivos
0,8 a 1,2 m³/hora para suelos granulares

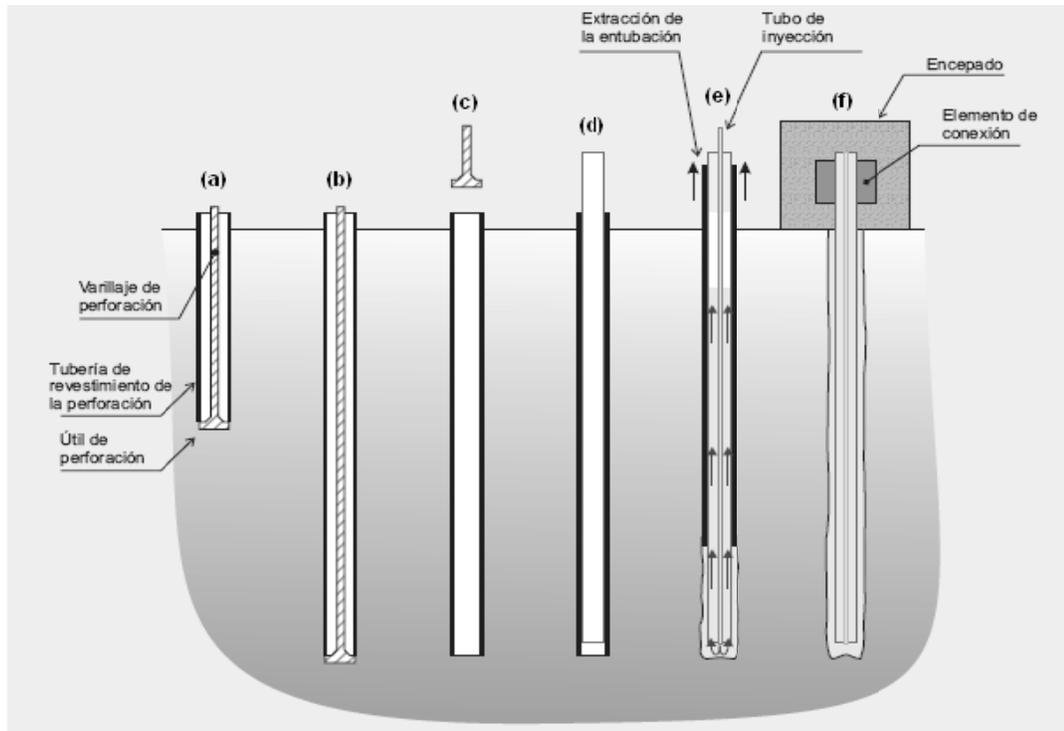
3.7.5 Retiro del entubado.

El entubado será extraído totalmente cuando el mortero sea colocado por completo.

3.7.6 Colocación del encepado en cabeza.

Al final de la colocación del mortero se procederá a incorporar un encepado en la cabeza del micropilote si es necesario o las disposiciones lo exigen.

Figura 3.15 SECUENCIA TÍPICA EN LA EJECUCIÓN DE UN MICROPILOTE



Fuente: Secretaría de Estado de Infraestructuras y Planificación (Octubre 2005); GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA.

CAPITULO IV



4 DESARROLLO DE LA APLICACIÓN DEL DISEÑO DE MICROPILOTES PARA EL LABORATORIO VIRTUAL DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA

La presente herramienta de **diseño**, tiene como finalidad calcular en base a la geometría del elemento y las características de los materiales en el que se encuentra inmerso los diferentes parámetros como: *capacidad de carga última por hundimiento tanto en micropilotes individuales como en grupo, resistencia al arranque, fallo estructural a compresión y tracción, tope estructural, resistencia estructural a flexión y cortante, asientos tanto en micropilotes individuales como en grupo y resistencia frente a esfuerzos horizontales.*

Los cálculos se basan en la metodología utilizada en la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carreteras del “Ministerio de Fomento, España” (MFOM)³; la cual toma como método de cálculo el propuesto por Bustamante, incorporando factores de seguridad para asegurarse que los resultados sean lo más correctos posibles, esto dependiendo del tipo de suelo, tipo de micropilote y sus características estructurales.

Para poder hacer uso de esta herramienta se deberá ingresar gratuitamente como usuario registrado del “Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica”, vía on-line a través de la dirección www.utpl.edu.ec/vleg, en la parte de DISEÑO/Micropilotes.

Todo el entorno trabaja en forma dinámica, en donde el usuario puede ingresar a cualquiera de los módulos antes descritos y proceder a digitar los datos correspondientes al cálculo que se exija para luego obtener el resultado correspondiente.

A continuación se explicara el correcto manejo de cada módulo así como también las metodologías empleadas en cada proceso que están disponibles en el entorno virtual mediante un ejemplo en cada uno de los casos.

4.1 COMPROBACIÓN FRENTE AL HUNDIMIENTO

Esta herramienta permite comparar, si la capacidad de resistencia tanto de fuste como de punta es suficiente para soportar las cargas axiales impuestas inicialmente sobre la estructura ya sea para un solo elemento o para un grupo, para lo cual se considera las características geotécnicas del suelo y la geometría del micropilote.

Paso 1. Ingreso de datos:

Se procederá a ingresar los datos tanto estructurales del micropilote como los datos geotécnicos del lugar a ser implantado y sus condiciones respectivamente en unidades del sistema internacional, se considerará la resistencia por punta, empotramiento en roca y condiciones freáticas a una profundidad de la superficie del suelo de 3 m y se comprobará la resistencia frente al arranque. Según la “GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE



CARRETERA; capítulo 1" se tomará en cuenta que el diámetro del micropilote no debe exceder más de 30 cm de diámetro: (Fig 4.1).

DATOS ESTRUCTURALES

Carga axial a compresión (P_c)	=	700 KN
Diámetro nominal del micropilote (D)	=	0.25 m
Longitud enterrada del micropilote (L)	=	13 m
Peso específico del hormigón (P_h)	=	24 KN/m ³
Factor de rozamiento terreno-fuste (kr)	=	1
$2/3 \leq Kr \leq 1$ (MFOM).		
Presión de inyección del mortero (P_i)	=	1 MPa
Coefficientes de minoración (F_c, F_o)	=	1.5

DATOS GEOTÉCNICOS DEL SUELO

Luego de haber ingresado los datos estructurales, se procede a identificar cuantos estratos existen y cuáles son sus propiedades geotécnicas.

Nota.- Si el nivel freático se encuentra dividiendo un estrato, entonces se tomarán como se fueran dos estratos, es decir el primero será el que se encuentra por encima del nivel freático y el segundo por debajo del nivel freático.

Se considerarán 3 estratos heterogéneos.

PRIMER ESTRATO

Espesor (Z)	=	3 m
Ángulo de fricción (ϕ)	=	0 °
Cohesión (c)	=	30 KN/m ²
Peso específico (γ)	=	18 KN/m ³

SEGUNDO ESTRATO

Espesor (Z)	=	5 m
Ángulo de fricción (ϕ)	=	0 °
Cohesión (c)	=	30 KN/m ²
Peso específico (γ)	=	18 KN/m ³

TERCER ESTRATO

Espesor (Z)	=	5 m
Ángulo de fricción (ϕ)	=	34 °
Cohesión (c)	=	0 KN/m ²
Peso específico (γ)	=	17.20 KN/m ³

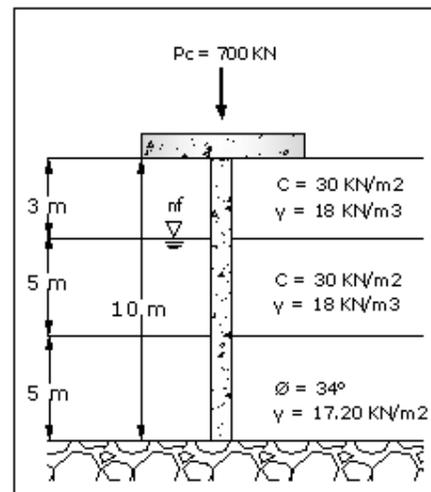


Figura 4.1 INGRESO DE DATOS ESTRUCTURALES Y GEOTÉCNICOS EN LA INTERFACE WEB

DATOS ESTRUCTURALES

Carga axial a compresión (P_c)

Diámetro nominal del micropilote (D)

longitud enterrada del micropilote (L)

Peso específico del Hormigón (P_h)

Factor de rozamiento terreno-fuste (k_r) ($2/3 \leq k_r \leq 1$)

Presión de inyección (P_i) (Si es a gravedad $P_i > 0$)

Coefficiente de minoración (F_c, F_D)

DATOS GEOTECNICOS

Numero de Estratos:

Espesor del estrato Z (m)	Angulo de fricción ϕ'	Cohesión C (KN/m ²)	Peso específico γ (KN/m ³)
<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="30"/>	<input type="text" value="18"/>
<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="30"/>	<input type="text" value="18"/>
<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="34"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="17.20"/>

Diagramas: Corte A-A' (DISEÑO DEL MICROPILOTE EMPOTRAMIENTO EN ROCA), MICROPILOTES EN GRUPO, Corte B-B'.

Paso 2. Activación de opciones:

En la siguiente etapa se decidirá si se desea considerar resistencia por punta y si a su vez el elemento está empotrado en roca, así como también considerar el nivel freático si lo hubiese. (Fig. 4.2).

Figura 4.2 OPCIONES A CONSIDERAR PARA EL CÁLCULO DE LA RESISTENCIA AL HUNDIMIENTO

Considerar resistencia por punta

Considerar empotramiento en roca

Considerar nivel freático

Profundidad del nivel freático (Z_{nf})

Si se considera empotramiento en roca, los datos serán ingresados de la siguiente manera:

DATOS CORRESPONDIENTES AL EMPOTRAMIENTO EN ROCA

La Longitud de la punta empotrada en la roca L_r no será menor a 6 veces su diámetro, $L_r = 6D$, resistencia a compresión simple de la roca $q_u = 188 MPa$ para calcular $q_{pe,d}$ cuyo tipo de roca presenta una clasificación de margocalizas (MFOM).

$$\begin{aligned}
 \text{Longitud de la punta empotrada en la roca } (L_r) &= 1.5 \text{ m} \\
 \text{Resistencia unitaria por fuste en el tramo empotrado } (F_{e,d}) &= 0.3 \text{ MPa} \\
 \text{Resistencia unitaria por punta en el tramo empotrado } (q_{pe,d}) &= 13.16 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

En la parte derecha tanto de $F_{e,d}$ como de $q_{pe,d}$, podremos encontrar un botón que nos mostrará un cuadro con los valores que se podrían ingresar de acuerdo a ensayos previamente realizados según MFOM.



NOTA.- Si fuera el caso en donde se desee habilitar la opción de empotramiento en roca, se deberá tomar en cuenta que el suelo rocoso será tomado como un cálculo individual por requerir otro tipo de datos auxiliares, es decir que en la parte de DATOS GEOTÉCNICOS únicamente se colocarán los suelos que se encuentren por encima del estrato rocoso.

Paso 3. Comprobando la resistencia frente al arranque:

Si se desea, se procederá a incluir la resistencia frente al arranque, marcando la opción correspondiente, e ingresando los valores según el ejemplo como sigue: (Fig. 4.3).

DATOS CORRESPONDIENTES A LA RESISTENCIA FRENTE AL ARRANQUE

Para ingresar el coeficiente de cargas sobre el micropilote (n) se supondrá que este está sometido a esfuerzos de tracción y compresión = 0.6 según MFOM.

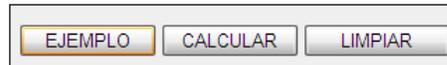
Esfuerzo axial a tracción (Pt) = 50 KN
 Coeficiente de seguridad según la disponibilidad de las cargas sobre el micropilote (n) = 0.6

Figura 4.3 COMPROBACIÓN FRENTE AL ARRANQUE

Paso 4. Ejecución del programa:

Cuando se haya terminado de ingresar todos los datos procedemos a **CALCULAR**, el cual se encuentra en la parte inferior de los últimos datos ingresados. (Fig.4.4).

Figura 4.4 BOTÓN QUE DA INICIO AL CÁLCULO, EJECUTAR UN EJEMPLO O LIMPIAR LOS DATOS DE LA PANTALLA PARA UN NUEVO EJEMPLO



A continuación aparecerán los resultados de la resistencia al hundimiento del micropilote individual y la resistencia al arranque siempre y cuando se la haya considerado. (Fig. 4.5). Los cálculos resultan de la siguiente manera:

Esfuerzo vertical:

$$\sigma'_{v_{z1}} = (\gamma_{suelo} - \gamma_{agua}) \cdot Z$$

$$\sigma'_{v_{z1}} = (18 - 9.81) \cdot 3$$

$$\sigma'_{v_{z1}} = 54 \text{ KN} / \text{m}^2$$



Esfuerzo Horizontal:

Como el ángulo de rozamiento ϕ' para los dos primeros estratos es 0, entonces:

$$k_0 = (1 - \text{seno}(\phi))$$
$$k_0 = (1 - \text{sen}(0)) = 1$$

$$\sigma'_{H_z} = k_0 \cdot \sigma'_{v(z)} + \frac{Pi}{3}$$
$$\sigma'_{H_{z1}} = (1) \cdot (54) + \frac{1000}{3}$$
$$\sigma'_{H_{z1}} = 387.33 \text{KN} / \text{m}^2$$

Para el tercer estrato el ángulo de fricción es diferente de cero, por lo tanto el esfuerzo horizontal será:

$$k_0 = (1 - \text{seno}(\phi))$$
$$k_0 = (1 - \text{sen}(34)) = 0.4408$$

$$\sigma'_{H_z} = k_0 \cdot \sigma'_{v(z)} + \frac{Pi}{3}$$
$$\sigma'_{H_{z3}} = (0.4408) \cdot (131.90) + \frac{1000}{3}$$
$$\sigma'_{H_{z3}} = 391.479 \text{KN} / \text{m}^2$$

Resistencia unitaria por fuste:

El coeficiente kr está comprendido entre $2/3$ a 1 , y ϕ es el ángulo de fricción interna del terreno.



Resistencia por fuste frente a esfuerzos de compresión:

Para obtener esta resistencia se tiene que realizar primeramente y de forma individual la operación siguiente:

$$Q_f = \sum(Ali \cdot f_{zi})$$

El área lateral se la calculará individualmente de acuerdo a la longitud del estrato que el micropilote esté atravesando, es decir:

$$Al_i = \pi \cdot D \cdot L_o$$

$$Al_1 = (3.1416)(0.25)(3)$$

$$Al_1 = 2.356m^2$$

L_o es la longitud del micropilote en cada estrato.

Cada nivel posee su resistencia por fuste individual, la cual al sumar según la fórmula descrita anteriormente **Q_f** nos da un valor de **816.953 KN**.

RESISTENCIA POR PUNTA

Si el micropilote no está empotrado en roca, y se desea calcular solo la capacidad por punta en el suelo, este corresponderá al 15% de resistencia por fuste, a aunque debido a la sección transversal no es recomendable considerar.

Resistencia por punta en roca:

Para $q_{pe,d}$ se a optado un valor de **$qu = 188 Mpa$** , y de acuerdo a la tabla que nos presenta a la derecha del valor ingresado para $q_{pe,d}$ se ha tomado como tipo de roca **MARGAS**, y el valor de f_{ed} , también con el mismo tipo de roca. Al_e es el área lateral de la parte empotrada y Ap_r es el área de la sección recta de la punta.



Resistencia última frente al hundimiento hundimiento:

Se sumarán las dos resistencias, la calculada por fuste **Qf** más la resistencia por punta **Qp** o en su defecto como es este caso la resistencia por punta en roca **Qpr**:

$$Q_u = Q_f + Q_{pr}$$

$$Q_u = 816.953 + 999.419$$

$$Q_u = 1816.372 \text{ KN}$$

Figura 4.5 RESULTADOS DEL ANÁLISIS PARA MICROPILETE INDIVIDUAL

RESULTADOS MICROPILETE INDIVIDUAL:			
	Esfuerzo Vertical $\sigma'v(z)$ (KN/m ²)	Esfuerzo Horizontal $\sigma'H(z)$ (KN/m ²)	Resistencia Unitaria por Fuste f (KN/m ²)
estrato 1	54	54	20
estrato 2	94.95	428.283	20
estrato 3	131.9	391.476	176.036
Resistencia por fuste frente a esfuerzos de compresión Qf			816.953 KN
Resistencia por punta en roca (Qpr)			999.419 KN
Resistencia última frente al hundimiento (Qu)			1816.372 KN
La resistencia última frente al hundimiento es satisfactoria ($Q_u \geq P_c$)			
RESULTADOS COMPROBACIÓN FRENTE AL ARRANQUE:			
Área lateral del micropilote (Al)		10.21	m ²
Rozamiento unitario por fuste frente a esfuerzos de tracción (ft)		129.622	KN/m ²
Resistencia del micropilote frente a esfuerzos de tracción (Qft)		1323.441	KN
Resistencia última frente al arranque (Qar)		1336.204	KN
La resistencia última frente al arranque es satisfactoria ($Q_{ar} \geq P_t$)			

Para la comprobación frente al arranque el área lateral del micropilote (**Al**) está definida por: $\pi \cdot D \cdot L = 10.21 \text{ m}^2$, y los demás resultados como siguen:

Rozamiento unitario por fuste frente a esfuerzos de tracción:

Internamente se calcula la sumatoria de cada uno de los rozamientos unitarios por fuste de cada estrato ($20+20+176.036 = 216.036$), que luego será multiplicado por el factor **n**, que es un coeficiente de seguridad según la disponibilidad de las cargas sobre el micropilote, si el elemento está sometido a esfuerzos de compresión y tracción **n = 0.60**, y si solamente está sometido a esfuerzos de tracción **n = 0.75**



Resistencia por fuste del micropilote frente a esfuerzos de tracción:

$$Qf_t = A_l \cdot f_t$$
$$Qf_t = (10.21) \cdot (129.621)$$
$$Qf_t = 1323.430 \text{ KN}$$

Resistencia última frente al arranque:

We es la componente del peso propio del micropilote, y está relacionado por el área transversal del elemento, su longitud total y el peso específico del hormigón. **Fwe** es un coeficiente de minoración que según *MFOM* vale **1.2**

$$Qar = Qf_t + \frac{We}{Fwe}$$
$$Qar = 1323.430 + \frac{((3.1416) \cdot (0.25^2) / 4) \cdot 13 \cdot 24}{1.2}$$
$$Qar = 1336.193 \text{ KN}$$

Al final del cálculo aparecerá en la parte inferior de cada resultado un mensajes donde se indica si el micropilote resiste las cargas aplicadas o mensajes donde se indica que el elemento falla por lo que se recomienda realizar la cimentación utilizando grupo de micropilotes: (Fig.4.6a y 4.6b).

Figura 4.6 MENSAJES DE COMUNICACIÓN ACERCA DEL CÁLCULO EFECTUADO

La resistencia última frente al hundimiento es satisfactoria ($Q_u \geq P_c$)
La resistencia última frente al arranque es satisfactoria ($Q_{ar} \geq P_t$)

(a)

La resistencia última frente al hundimiento no es satisfactoria ($Q_u < P_c$), se recomienda incrementar el diametro o realizar la cimentación en grupo.
Si la cimentacion es en grupo se recomienda ($num = P_c + W / Q_u$) $num = 2$ micropilotes. Donde W es el peso del elemento
La resistencia última frente al arranque no es satisfactoria ($Q_{ar} < P_t$), se recomienda aumentar la longitud del micropilote

(b)



De ser el caso (**b**), se procederá a habilitar la siguiente herramienta que se encuentra debajo de los mensajes “**COMPROBAR HUNDIMIENTO EN GRUPO DE MICROPILOTES**”. (Esto para el cálculo de Hundimiento).

Como ejemplo se ha asumido la carga a compresión $P_c = 3000 \text{ KN}$, no habrá empotramiento en roca y no se considerará resistencia por punta. El resto de datos serán los mismos que el ejemplo anterior.

Luego de ingresar los valores correspondientes presionamos **calcular**, luego de esto nos saldrá un mensaje en color rojo donde nos da dos opciones: aumentar el diámetro o colocar más micropilotes con una recomendación del número que deberíamos poner. En este caso se recomiendan 2 micropilotes (Fig. 4.7).

Figura 4.7 MENSAJE DE INFORMACIÓN

La resistencia última frente al hundimiento no es satisfactoria ($Q_u < P_c$), se recomienda incrementar el diámetro o realizar la cimentación en grupo.
Si la cimentación es en grupo se recomienda ($num = P_c + W/Q_u$) $num = 2$ micropilotes. Donde W es el peso del elemento

Se escoge la ecuación a utilizar para el cálculo de la eficiencia de grupo, el número de micropilotes por fila m el número de micropilotes por columna n (Fig. 4.8).

Figura 4.8 INGRESO DE DATOS PARA DETERMINAR EL HUNDIMIENTO DE MICROPILOTES EN GRUPO

<input checked="" type="checkbox"/> COMPROBAR HUNDIMIENTO EN GRUPO DE MICROPILOTES	
Ecuación utilizada para calcular la eficiencia de grupo	CONVERSE-LABARRE
Número de micropilotes por fila (m)	2
Número de micropilotes por columna (n)	1
Factor para calcular el espaciamiento entre micropilotes (sd) sd = 2.5 a 4	2.5

En la figura 3.8 el factor sd se ha considerado según MFOM de (2.5 a 4), en este caso es de 2.5 entonces la distancia centro a centro de micropilotes es: $2.5D = (2.5)(0.25) = 0.625 \text{ m}$.

Eficiencia de grupo:

Con $P_c = 3000 \text{ KN}$ el número de micropilotes que aparecerá en el mensaje será de 2 con forme a lo indicado anteriormente. Seguidamente se optará por utilizar una de las tres ecuaciones para calcular la eficiencia de grupo, en este caso se utilizará “**CONVERSE-LABARRE**”. Donde D es el diámetro del micropilote y s es el espaciamiento centro a centro entre micropilotes.



Resistencia frente al hundimiento en grupo de pilotes:

Si $\eta < 1$ entonces la resistencia frente al hundimiento en grupo de pilotes será dada por $Qg = \eta \Sigma Qu$, pero si $\eta \geq 1$ entonces $Qg = \Sigma Qu$.

En este caso $\eta < 1$ entonces:

$$Qhg = \eta(m \cdot n \cdot Qu)$$

$$Qhg = 0.87888(2)(1)(1816.372)$$

$$Qhg = 3192.749 \text{ KN}$$

Al final aparecerán los resultados seguidos de un mensaje donde nos especificará que la cimentación realizada mediante grupo es satisfactoria. (Fig. 4.9).

Figura 4.9 RESULTADOS PARA EL HUNDIMIENTO DE MICROPILOTES EN GRUPO

RESULTADOS MICROPILOTES EN GRUPO:	
Distancia centro a centro entre micropilotes (s)	0.625 m
Eficiencia de grupo en micropilotes (η)	87.888 %
Resistencia última frente al hundimiento en grupo (Qhg)	3192.746 KN
La resistencia última frente al hundimiento en grupo es satisfactoria ($Qhg \geq Pc$)	

4.2 RESISTENCIA ESTRUCTURAL DEL MICROPILOTE A COMPRESIÓN Y TRACCIÓN

Esta herramienta permite comprobar la capacidad de los micropilotes tanto a esfuerzos de compresión y tracción, para lo cual considera las características del material del elemento y su geometría, así como también determina el tope estructural del micropilote.

Paso 1: Ingreso de datos

Se comenzará ingresando los datos estructurales del micropilote en unidades del sistema internacional, con sus respectivas condiciones como sigue: (Fig.4.10).

DATOS ESTRUCTURALES

Carga Axial de cálculo (compresión) (Pc)	=	1000.00 KN
Carga axial de cálculo (tracción) (Pt)	=	400.00 KN
Diámetro exterior nominal de la armadura tubular (d_e)	=	0.30 m
Diámetro interior nominal de la armadura tubular (d_i)	=	0.27 m
Sección neta de la lechada del mortero (A_c)	=	0.0568 m ²
Sección total de las barras corrugadas de acero (A_s)	=	0.000471 m ²
Límite elástico del acero de las armaduras corrugadas (f_{sk})	=	420 MPa
Límite elástico del acero de la armadura tubular (f_y)	=	420 MPa



Resistencia característica del mortero a los 28 días de edad (**fck**) = 28 MPa
Reducción de espesor de la armadura por efecto de corrosión (**re**) (**cuadro 4.1**). = 0.3 mm

Los coeficientes parciales de seguridad propuestos por *MFOM* que son como su nombre lo indica son factores de seguridad que dependen del tipo de material:

Coeficiente parcial de seguridad para el acero (γ_s) = 1.15
Coeficiente parcial de seguridad para armadura tubular (γ_a) = 1.10
Coeficiente parcial de seguridad para el mortero (γ_c) = 1.50

Cuando se desprece cualquier material del que esté formado el elemento el coeficiente correspondiente a ese material será 1.

Los coeficientes restantes tanto para $F_{u,c}$ y $F_{u,t}$ y que dependen del tipo de unión con la que se une el tubo, se los puede obtener del **cuadro 4.2**; mientras que el coeficiente **Fe** que depende exclusivamente del tipo de terreno y perforación se lo puede conseguir del **cuadro 4.3**, que al igual que **re** los podemos visualizar en la interfaz o por medio de las que se muestran a continuación, si se tratara de un micropilote hecho solamente de concreto **Fu,c = 0.5**.

Cuadro 4.1 VALORES DE re mm

TIPO DE TERRENO	VIDA ÚTIL REQUERIDA AL MICROPILOTE (años)				
	5	25	50	75	100
Suelos naturales sin alterar	0.00	0.30	0.60	0.90	1.20
Suelos naturales contaminados o suelos industriales	0.15	0.75	1.50	2.25	3.00
Suelos naturales agresivos (turbas ciénagas, etc..)	0.20	1.00	1.75	2.50	3.25
Rellenos no agresivos sin compactar	0.18	0.70	1.20	1.70	2.20
Rellenos agresivos sin compactar (cenizas, escorias, etc..)	0.50	2.00	3.25	4.50	5.75

Fuente: GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA; (Octubre 2005).

Cuadro 4.2 COEFICIENTE $F_{u,c}$ y $F_{u,t}$

Mediante manguitos exteriores doblemente roscados, sin disminución de sección	1.0
De rosca machihembrada con sección ensanchada	
De rosca machihembrada, sin sección ensanchada y con contacto a tope en ambos extremos	
Otras uniones diseñadas específicamente para no sufrir pérdidas de resistencia	
Resto de casos	0.5

Fuente: GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA; (Octubre 2005).

Cuadro 4.3 COEFICIENTE F_e

TIPO DE TERRENO Y DE PERFORACIÓN		
T I	Terreno con nivel freático por encima de la punta del micropilote y perforación sin revestir, sin empleo de lodos	1.50
T II	Terreno con nivel freático permanente bajo la punta del micropilote y perforación sin revestir, sin empleo de lodos	1.30
T II	Cualquier tipo de terreno perforado con lodos	1.15
T IV	Cualquier tipo de terreno perforado al amparo de revestimiento recuperable	1.05
T V	Micropilote con tubería de revestimiento dejada <<in situ>> de forma permanente (camisa perdida)	1.00

Fuente: GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA; (Octubre 2005).

El factor empírico de pandeo R , según MFOM tendrá un valor **1** a menos que se especifique lo contrario.

Figura 4.10 INGRESO DE DATOS ESTRUCTURALES

DATOS ESTRUCTURALES:

Carga axial a compresión (P_c)	1000	KN
Carga axial a tracción (P_t)	400	KN
Diámetro exterior nominal de la armadura tubular (d_e)	0.3	m
Diámetro interior nominal de la armadura tubular (d_i)	0.27	m
Sección neta de la lechada de mortero (A_c)	0.0568	m ²
Sección total de las barras de acero (A_s)	0.000471	m ²
Límite elástico de las barras de acero (f_{sk})	420	MPa
Límite elástico de la armadura tubular (f_y)	420	MPa
Resistencia característica del mortero a los 28 días (f'_c)	28	MPa
Reducción de espesor de la armadura por efecto de corrosión (r_e)	0.3	mm
Coefficiente parcial de seguridad para el acero (γ_s) Según MFOM $\gamma_s = 1.15$	1.15	
Coefficiente parcial de seguridad para armadura tubular (γ_a) Según MFOM $\gamma_a = 1.10$	1.1	
Coefficiente parcial de seguridad para el mortero (γ_c) Según MFOM $\gamma_c = 1.50$	1.5	
Coefficiente de minoración del área de la armadura tubular en función del tipo de unión (compresión $F_{u,c}$) y (Tracción $F_{u,t}$)	0.5	
Coefficiente en función del tipo de terreno (F_e)	1	
Factor Empírico de pandeo (R)	1	

CORTE A - A'
ARMADURA TUBULAR

SECCIONES: ACERO Y MORTERO



Paso 2: Activación de opciones

Una vez ingresado los datos en la parte inferior tenemos una opción que nos permite calcular el tope estructural, esto si existe armadura tubular.

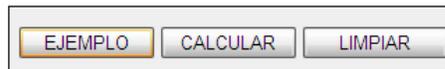
DATOS DE ENTRADA PARA CALCULAR EL TOPE ESTRUCTURAL DEL MICROPILOTE:

Se habilitará solamente la condición de **tope estructural** e inmediatamente elegir el modelo matemático con la que se creará necesario trabajar; entre estas está la sugerida por **(1) JIMENEZ SALAS**, **(2) LIBRO DE HORMIGON ESTRUCTURAL (EH)** y **(3) LIBRO DE HORMIGON ESTRUCTURAL ESPAÑA (EHE)**. En este caso se escogió la propuesta por Jiménez Salas.

Paso 3: Ejecución del programa

Una vez ingresados todos los datos correspondientes referentes a la parte estructural del elemento procedemos a **CALCULAR** (Fig. 4.11).

Figura 4.11 BOTÓN QUE DA INICIO AL CÁLCULO, EJECUTAR UN EJEMPLO O LIMPIAR LOS DATOS PARA UN NUEVO PROYECTO



A continuación aparecerán los resultados correspondientes a la resistencia estructural a compresión y tracción del micropilote individual y los resultados del tope estructural siempre y cuando se la haya considerado. (Fig. 4.12). Los cálculos resultan de la siguiente manera:

Resistencia de cálculo del mortero o lechada de cemento a compresión:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$
$$f_{cd} = \frac{28000}{1.5}$$

Resistencia de cálculo del acero de las armaduras corrugadas:

$$f_{sd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_s}$$
$$f_{sd} = \frac{420000}{1.15}$$



Resistencia de cálculo del acero de la armadura tubular:

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_a}$$

$$f_{yd} = \frac{420000}{1.1}$$

Sección de cálculo de la armadura tubular de acero a compresión y tracción:

$$A_{ac} = \frac{\pi}{4} [(d_e - 2r_e)^2 - d_j^2] \cdot F_{u,c}$$

$$A_{ac} = \frac{3.1416}{4} [(0.30 - 2(0.3/1000))^2 - (0.27)^2] (0.5)$$

$$A_{at} = \frac{\pi}{4} [(d_e - 2r_e)^2 - d_j^2] \cdot F_{u,t}$$

$$A_{at} = \frac{3.1416}{4} [(0.30 - 2(0.3/1000))^2 - (0.27)^2] (0.5)$$

Resistencia estructural del micropilote sometido a esfuerzos de compresión:

$$Q_{ec} = (0.85 \cdot A_c \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{sd} + A_{ac} \cdot f_{yd}) \frac{R}{1.20 \cdot F_e}$$

$$Q_{ec} = ((0.85)(0.0568)(18666.667) + (0.000236)(208695.652) + (0.0066)(218181.818)) \frac{1}{1.20(1)}$$

$$Q_{ec} = 2986.087 \text{ KN}$$

Resistencia estructural del micropilote sometido a esfuerzos de tracción:

$$Q_{et} = (A_s \cdot f_{sd} + A_{at} \cdot f_{yd}) \cdot \frac{1}{1.10}$$

$$Q_{et} = ((0.000471)(208695.652) + (0.0066)(218181.818)) \frac{1}{1.1}$$

$$Q_{et} = 2438.237 \text{ KN}$$

Tope estructural:

$$T = 0.25 \cdot f_{ck} \cdot A_c + 0.4 \cdot f_{yk} \cdot A_{st}$$

$$T = 0.25 \cdot f_{ck} \cdot A_c + 0.4 \cdot f_{yk} \cdot (A_s + ((\pi \cdot d_e^2 / 4) - (\pi \cdot d_j^2 / 4)))$$

$$T = (0.25)(28)(0.0568) + (0.4)(420)(0.000471 + 0.01343)$$

$$T = 2.733 \text{ MN}$$



Figura 4.12 RESULTADOS DEL ANÁLISIS PARA MICROPILETE INDIVIDUAL

RESULTADOS:	
Resistencia estructural del micropilote sometido a esfuerzos de compresión (Q_{ec})	2986.087 KN
Resistencia estructural del micropilote sometido a esfuerzos de tracción (Q_{et})	2438.237 KN
Tope estructural (T)	2.733 MN

Al final del cálculo aparecerá en la parte inferior, mensajes donde se comunica si el cálculo es satisfactorio tanto a compresión y tracción o mensajes donde se indica que el elemento falla (Fig.4.13a y 4.13b).

Figura 4.13 MENSAJES DE COMUNICACIÓN ACERCA DEL CÁLCULO EFECTUADO

La resistencia estructural frente a esfuerzos de compresión es satisfactoria ($Q_{ec} \geq P_c$)
La resistencia estructural frente a esfuerzos de tracción es satisfactoria ($Q_{et} \geq P_t$)

(a)

La resistencia estructural frente a esfuerzos de compresión no es satisfactoria ($Q_{ec} < P_c$)
La resistencia estructural frente a esfuerzos de tracción no es satisfactoria ($Q_{et} < P_t$)

(b)

4.3 RESISTENCIA ESTRUCTURAL A FLEXIÓN Y CORTANTE

Esta herramienta permite comprobar la capacidad de los micropilotes tanto a esfuerzos de flexión y cortante para lo cual considera las características del material del elemento y su geometría.

Paso 1: Ingreso de datos

Ingresar los datos estructurales para el micropilote en análisis (Fig. 4.14), para ello aquí se detallan los siguientes datos que servirán de ejemplo en el cálculo de la resistencia estructural a flexión y cortante.

Nota: Este módulo permite calcular la resistencia estructural a flexión y cortante por separado o si se prefiere, se puede considerar la resistencia frente a esfuerzos combinados (flexión y cortante).

En el siguiente ejemplo se considerará la resistencia frente a esfuerzos combinados:

DATOS ESTRUCTURALES

Momento flector (M)	=	16 KN*m
Esfuerzo cortante (V)	=	30 KN/m ²
Diámetro exterior nominal de la armadura tubular (d_e)	=	0.25 m
Diámetro interior nominal de la armadura tubular (d_i)	=	0.24 m
Reducción de espesor de la armadura por efecto de corrosión (re), (utilizar la tabla expuesta en el enunciado referente a resistencia estructural a compresión y tracción)	=	0.3 mm
Límite elástico del acero de la armadura tubular (f_y)	=	420 MPa

Figura 4.14 INGRESO DE DATOS ESTRUCTURALES EN LA INTERFACE WEB

DATOS ESTRUCTURALES:

Momento flector (M)	16 KN*m
Esfuerzo cortante (V)	30 KN/m ²
Diámetro exterior nominal de la armadura tubular (d_e)	0.25 m
Diámetro interior nominal de la armadura tubular (d_i)	0.24 m
Reducción de espesor de la armadura por efecto de corrosión (re)	0.3 mm
Límite elástico del acero de la armadura tubular (f_y)	420 MPa
Coeficiente parcial de seguridad para armadura tubular (γ_a) Según MFOH $\gamma_a = 1.10$	1.1
Coeficiente de minoración del módulo resistente de la armadura tubular en función del tipo de unión (F_u, f) Según MFOH $F_u, f = 0.50$	0.5

Considerar resistencia estructural frente a esfuerzos combinados (flexión y tracción)

Diagrama: Corte A-A' ARMADURA TUBULAR. Muestra un tubo con diámetro exterior d_e e interior d_i . Se indican momentos M y esfuerzos cortantes V en la parte superior.

El coeficiente parcial de seguridad para armadura tubular (γ_a) y el coeficiente de minoración del módulo resistente de la armadura tubular en función del tipo de unión F_u, f propuestos por MFOH son **1.1** y **0.50** respectivamente.

Paso 2: Activación de opciones

Para este caso y como ya se indicó se tomará en cuenta la resistencia a esfuerzos combinados, para lo cual habilitaremos la opción **“Considerar resistencia estructural frente a esfuerzos combinados”**. (Fig. 4.15)

Figura 4.15 CONDICIÓN DE CÁLCULO PARA CONSIDERAR ESFUERZOS COMBINADOS

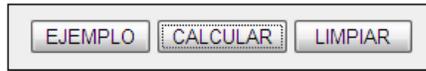
Considerar resistencia estructural frente a esfuerzos combinados (flexión y tracción)

Paso 3: Ejecución del programa

Para obtener los resultados procedemos a **CALCULAR**. (Fig. 4.16)



Figura 4.16 BOTÓN QUE DA INICIO AL CÁLCULO, EJECUTAR UN EJEMPLO O LIMPIAR LOS LA PANTALLA PARA UN NUEVO EJEMPLO



A continuación aparecen los resultados del análisis (Fig.4.17). Los cálculos se realizarán de acuerdo al siguiente proceso:

Sección reducida de la armadura tubular de acero:

$$A_{pr} = \frac{\pi}{4} [(d_e - 2 \cdot r_e)^2 - d_j^2]$$

$$A_{pr} = \frac{3.1416}{4} [(0.25 - 2(0.3/1000))^2 - (0.24)^2]$$

$$A_{pr} = 0.0036m^2$$

Módulo plástico de la sección:

$$W_{pl} = \frac{(d_e - 2 \cdot r_e)^3 - d_j^3}{6}$$

$$W_{pl} = \frac{(0.25 - 2(0.3/1000))^3 - (0.24)^3}{6}$$

$$W_{pl} = 0.0002815 \cdot m^3$$

Módulo elástico de la sección:

$$W_{el} = \frac{\pi [(d_e - 2 \cdot r_e)^4 - d_j^4]}{32(d_e - 2 \cdot r_e)}$$

$$W_{el} = \frac{3.1416 [(0.25 - 2(0.3/1000))^4 - (0.24)^4]}{32(0.25 - 2(0.3/1000))}$$

$$W_{el} = 0.0002169 \cdot m^3$$



Valor de cálculo de la resistencia plástica de la sección a esfuerzo cortante:

$$V_p = \frac{2 \cdot A_{Pr}}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_y}{\gamma_a}$$

$$V_p = \frac{2(0.0036)}{3.1426} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{420}{1.1}$$

$$V_p = 0.505218MN$$

$$Q_{cortante} = V_p \text{ KN.}$$

$$Q_{cortante} = 505.218 \text{ KN}$$

Resistencia de cálculo de la sección a flexión, teniendo en cuenta la interacción del esfuerzo cortante:

Como ya se ha escogido la opción, internamente se analizará las dos condiciones que decidirán que fórmula utilizar:

$$Si \Rightarrow V \leq 0.5 \cdot Q_{cortante}, \quad Q_{Vflexión} = Q_{flexión}$$

$$Si \Rightarrow V > 0.5 \cdot Q_{cortante}, \quad Q_{Vflexión} = (1 - \rho) \cdot Q_{flexión}$$

ρ es un factor de reducción = $[(2 \cdot V/V_p) - 1]^2$

Como $V \leq 0.5V_p$ entonces $Q_{Vflexión} = Q_{flexión}$, y $Q_{flexión}$ se calculará de la siguiente manera:

Se deberá tomar en cuentas las siguientes condiciones:

$$Si \Rightarrow \frac{d_e - 2 \cdot r_e}{t - r_e} \leq \frac{16450}{f_y}, \quad Q_{flexión} = W_{pl} \frac{f_y}{\gamma_a} \cdot F_{u,f}$$

$$Si \Rightarrow \frac{16450}{f_y} < \frac{d_e - 2 \cdot r_e}{t - r_e} \leq \frac{21150}{f_y}, \quad Q_{flexión} = W_{el} \frac{f_y}{\gamma_a} \cdot F_{u,f}$$

La primera condición cumple, por lo que recurriremos a la primera fórmula:



$$Q_{flexión} = W_{pl} \cdot \frac{f_y}{\gamma_a} \cdot F_{u,f}$$

$$Q_{flexión} = 0.0002815 \cdot \frac{420000}{1.1} \cdot 0.50$$

$$Q_{flexión} = 53.741 \text{ KN} / \text{m}^2$$

Figura 4.17 RESULTADOS DEL ANÁLISIS PARA LA RESISTENCIA A FLEXION Y CORTANTE

RESULTADOS:	
Sección reducida de la armadura tubular de acero por efecto de la corrosión (Apr)	0.0036 m ²
Módulo plástico de la sección (Wpp)	0.0002815 m ³
Módulo elástico de la sección (Wep)	0.0002169 m ³
Resistencia última de la sección a cortante (Qcortante)	505.218 KN
Momento máximo que resiste la sección a flexión (Qflexión)	53.741 KN*m
La resistencia de cálculo de la sección a cortante es satisfactoria (Qcortante ≥ V)	
El momento máximo que resiste la sección a flexión es satisfactoria (Qflexión ≥ M)	

Luego del análisis aparecerán notas especificando si la resistencia a flexión y cortante es satisfactoria o si definitivamente el micropilote falla.

4.4 CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS EN MICROPILOTES

Esta herramienta permite determinar el asiento del micropilote aislado frente a una carga axial de compresión que actúa directamente sobre el encepado del elemento, para lo cual considera la geometría del elemento y las características del suelo que componen el último estrato donde se asienta la estructura.

Paso 1: Activación de opciones

Dentro de esta herramienta tenemos dos opciones para el cálculo del asentamiento para suelos **GRANULARES** y **COHESIVOS**. Se debe tomar en cuenta que los datos que se ingresaran corresponderán al último estrato donde se apoyará el micropilote.

Como ejemplo se activa la opción **“MICROPILOTE EN TERRENO COHESIVO”** (Fig. 4.18).

Figura 4.18 OPCIONES PARA CALCULAR EL ASENTAMIENTO DE MICROPILOTES EN SUELO COHESIVO O GRANULAR

<input checked="" type="checkbox"/>	MICROPILOTE EN TERRENO COHESIVO
<input type="checkbox"/>	MICROPILOTE EN TERRENO GRANULAR



Paso 2: Ingreso de datos

A continuación se habilitará el cuadro de ingreso de datos correspondientes a micropilote el terreno cohesivo. (Fig. 4.19), procediendo a ingresar los datos como sigue:

DATOS ESTRUCTURALES

Carga axial a compresión (P_c)	=	175	KN
Longitud total del micropilote (L)	=	10	m
Cohesión del suelo (C)	=	30	KN/m ²
Peso específico (γ)	=	18	KN/m ³
Factor adimensional de proporcionalidad (N_k)	=	15	
N_k = 5 a 20			

N_k depende del tipo de terreno, profundidad y otros elementos por lo general es igual a 15.

Figura 4.19 INGRESO DE DATOS ESTRUCTURALES

Paso 3: Ejecución del programa

A continuación enviamos a **CALCULAR**, el cual dará inicio a la ejecución de los cálculos correspondiente (Fig. 4.20):

Esfuerzo vertical:

$$\sigma'_v = (\gamma_{suelo})L$$

$$\sigma'_v = (18)(10)$$



Resistencia unitaria del terreno a la penetración estática:

Asiento del micropilote en terreno cohesivo:

$$S_{NC} = \frac{0.6 \cdot P_c}{L \cdot q_c}$$
$$S_{NC} = \frac{0.6(175)}{(10)(630)}$$

Figura 4.20 RESULTADOS DEL ANÁLISIS PARA EL ASIENTO EN TERRENO COHESIVO



4.5 CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS EN GRUPO DE MICROPILOTES

Esta herramienta permite determinar el asiento del grupo de micropilotes frente a una carga axial de compresión que actúa directamente sobre la cabeza del grupo, para lo cual considera la geometría del elemento y las características del suelo en el cual los micropilotes se asientan.

Paso 1: Ingreso de datos

Primeramente procedemos a ingresar los datos de la parte estructural tomando como referencia el gráfico que se encuentra en la parte derecha de la interfaz web (Fig.4.21) correspondiente a esta herramienta.

DATOS ESTRUCTURALES

Carga aplicada al grupo de micropilotes (Q_g)	=	700 KN
Diámetro del micropilote individual (D)	=	0.25 m
Altura del los micropilotes (L)	=	7 m
Número de micropilotes por fila (m)	=	2
Número de micropilotes por columna (n)	=	2
Factor para el cálculo de (s) (Se escogerá de 2.5 a 4 veces el diámetro)	=	2.50
Asiento del micropilote aislado (S_o)	=	16.67 mm

Luego de haber ingresado los datos referentes al micropilote, procedemos a digitar los datos geotécnicos correspondientes al suelo en sus respectivos estratos.

NUMERO DE ESTRATOS: 2

PRIMER ESTRATO

Espesor (**Z**) = 3 m
 Módulo de Poisson (**v**) = 0.30
 Módulo de elasticidad del terreno (**E**) = 10000 KN/m²

SEGUNDO ESTRATO

Espesor (**Z**) = 4 m
 Módulo de Poisson (**v**) = 0.30
 Módulo de elasticidad del terreno (**E**) = 11000 KN/m²

Algunos valores para el módulo de poisson y el módulo de elasticidad del terreno se los puede visualizar en el **cuadro 4.4**.

Figura 4.21 INGRESO DE DATOS ESTRUCTURALES Y GEOTÉCNICOS

DATOS DE CÁLCULO

Carga axial aplicada al grupo de micropilotes (Qg) = 700 KN

Diametro del micropilote individual (D) = 0.25 m

Longitud de los micropilotes (L) = 7 m

Número de micropilotes por fila (m) = 2

Número de micropilotes por columna (n) = 2

Factor para calcular el espaciamiento entre micropilotes (sf) = 2.50

Asiento del micropilote aislado (So) sometido a una carga axial igual a la media de las que corresponden a cada uno de los pilotes del grupo = 16.67 mm [Ayudar](#)

PROPIEDADES DEL SUELO

Numero de Estratos: DOS

	Espesor del estrato Z (m)	Módulo de Poisson v	Módulo de Elasticidad del Terreno E (KN/m ²)
Estrato 1	3.0	0.3	10000
Estrato 2	4.0	0.3	11000

Diagrama: Sección A-A' de micropilotes en grupo. Muestra un grupo de micropilotes con una carga axial Qg aplicada. Se indican las profundidades Z1 y Z2, la longitud total L, y el espaciamiento H1 = L/3. Se muestra también un diagrama de la disposición de los micropilotes en un grupo (2x2) con espaciamientos S y Lg, y el diámetro D del micropilote individual.

NOTA.- Para el dato del asiento del micropilote aislado **S_o**, deberá calcularse mediante la metodología utilizada anteriormente y utilizando una carga **P_c** igual a la carga total dividida para en número de micropilotes que conformen el grupo, es decir que para este ejemplo la carga total es de 700 KN, lo que indica que se tendrá que dividir entre el número de micropilotes que conforman el grupo para con ello calcular en asiento individual en el micropilote. Se tendrá acceso a esto mediante un link (Fig 4.22).



Cuadro 4.4 CONSTANTES ELÁSTICAS DE DIFERENTES SUELOS MODIFICADAS DE ACUERDO CON EL U.S. DEPARTMENT OF THE NAVY (1982) Y BOWLES (1988).

TIPO DE SUELO	Rango de valores típicos	Coeficiente de Poisson, ν (adimensional)	Estimación de Es a partir de N	
	Módulo de Young, Es (MPa)		Tipo de suelo	Es (MPa)
Arcilla:				
Blanda sensible	2.4 - 15	0.4 - 0.5 (no drenada)	limos, limos arenosos, mezclas levemente cohesivas.	0.4 N1
Medianamente rígida a rígida	15 - 50		Arenas limpias finas a medias y arenas levemente limosas.	0.7 N1
Muy rígida	50 - 100		Arenas gruesas y arenas con poca grava. grava arenosa y gravas.	1.0 N1 1.1 N1
Loes	15 - 60	0.1 - 0.3	grava arenosa y gravas	1.1 N1
Limo	2 - 20	0.3 - 0.35		
			Estimación de Es a partir de Su	
Arena fina:		0.25	Arcilla blanda sensible.	400Su - 1000Su
Suelta	7.5 - 10			
Medianamente densa	10 - 20			
Arena:		0.20 - 0.35	Arcilla medianamente rígida a rígida. Arcilla muy rígida.	1500Su - 2400Su 3000Su - 4000Su
Suelta	10 - 25			
Medianamente densa	25 - 50	0.30 - 0.40		
Densa	50 - 75			
			Estimación de Es a partir de qc	
Grava:		0.20 - 0.35	Suelos arenosos.	4 qc
Suelta	25 - 75			
Medianamente densa	75 - 100			
Densa	100 - 200	0.30 - 0.40		

Fuente: ESPECIFICACIONES AASHTO PARA EL DISEÑO DE PUENTES POR EL MÉTODO LRFD

Figura 4.22 LINK DE REDIRECCIONAMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL ASIENTO INDIVIDUAL DEL MICROPILOTE

Link para acceder al calculo de asiento individual

Asiento del micropilote aislado (S_0) sometido a una carga axial igual a la media de las que corresponden a cada uno de los pilotes del grupo

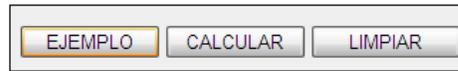
16.67 mm [Ir a Asiento Individual](#)

Paso 2: Ejecución del programa

Se procederá a **CALCULAR** (Fig. 4.23).



Figura 4.23 BOTÓN QUE DA INICIO AL CÁLCULO, EJECUTAR UN EJEMPLO O LIMPIAR LOS DATOS PARA UN NUEVO PROYECTO

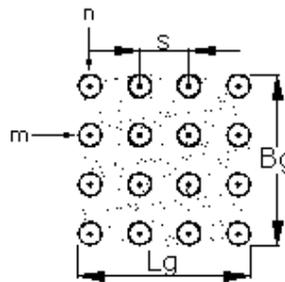


Inmediatamente aparecerán los resultados correspondientes al asiento en grupo de micropilotes propuesto por MFOM. (Fig. 4.24).

El proceso de cálculo es el siguiente:

Longitud y base total del grupo de micropilotes:

MICROPILOTES EN GRUPO



Incremento de la presión vertical total:

Como $Lg/Bg \leq 10$, entonces:

$$\Delta\sigma'_{vi} = p \cdot (1 - \cos^3 \alpha)$$

$$a = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{(0.88)(0.88)}{3.1416}} = 0.4964m$$

$$\alpha = \arctg(a / H)$$

$$\alpha = \arctg(0.4965 / 3)$$

$$\alpha = 0.164 \text{radianes}$$

$$\Delta\sigma'_{vi} = ((700)/(0.88)(0.88)) \cdot (1 - \cos^3(0.164))$$

$$\Delta\sigma'_{vi} = 35.92 \text{KN} / m^2$$



Modulo de poisson equivalente:

Módulo de elasticidad medio equivalente del terreno:

$$E_m = \frac{\sum \Delta \sigma_i \cdot z_i}{\sum \left(\frac{\Delta \sigma_i}{E_i} \right) \cdot z_i}$$

$$E_m = \frac{134.87}{0.01324}$$

$$E_m = 10186.221 \text{KN} / \text{m}^2$$

Asiento del grupo de micropilotes:

$$S_g = S_o + 0.8 \frac{Q_g (1 - V_{equiva}^2)}{E_m (B_g + H_1)(L_g + H_1)}$$

$$S_g = (16.67 / 1000) + (0.8) \frac{700(1 - 0.30^2)}{10186.221(0.88 + 3.33)(0.88 + 3.33)}$$

$$S_g = 0.021515 \text{m} \approx 21.515 \text{mm}$$

Figura 4.24 RESULTADOS DEL ANÁLISIS CORRESPONDIENTE AL ASIENTO EN GRUPO DE MICROPILOTES

RESULTADOS:	
Longitud del encepado (Lg)	0.88 m
Base del encepado (Bg)	0.88 m
Modulo de poisson equivalente (V equiva)	0.3
Módulo de Elasticidad medio equivalente del Terreno (Em)	10186.221 KN/m ²
Distancia centro a centro entre micropilotes (s)	0.625 m
Asiento del grupo (Sg)	21.515 mm



4.6 CARGA LATERAL

El método de análisis mediante curvas $p-y$ considera las reacciones producidas por el suelo frente a desplazamientos laterales, los cuales pueden ser no lineales, este método se basa en el modelo de *WINKLER* donde resistencia unitaria del suelo debido a una carga horizontal es representada por una serie de resortes ubicados a lo largo de la estructura. Por cada estrato se generan curvas $p-y$ las cuales dependen principalmente de las características del suelo y de la longitud del pilote.

Para determinar el comportamiento lateral del pilote se necesita datos correspondientes a la geometría y materiales del pilote y las características del suelo; dichos datos son procesados por el programa *OpenSees*, quien será el encargado de analizar el comportamiento de los pilotes frente a una carga lateral incremental.

Paso 1: Ingreso de datos

Antes de ingresar los valores se deberá decidir si se trata de un solo pilote o de un grupo de pilotes (*Fig. 4.25*).

Figura 4.25 SELECCIÓN DE OPCIONES



La opción de “*Micropilote Individual*”, nos sirve también para diseñar cortinas de micropilotes, (pilotes colocados en una sola fila).

Ingresamos los datos estructurales del pilote y geotécnicos del suelo donde será embebido el elemento (*Fig. 4.26*), para ello se detallan los siguientes datos que servirán de ejemplo para analizar la capacidad del elemento si se lo sometiera a una carga lateral.

DATOS ESTRUCTURALES

Carga axial (P)	=	1000	KN
Nivel del cabezal del pilote (La)	=	0.50	m
Espesor del cabezal (h)	=	0.50	m
Separación entre pilotes (s)	=	1.25	m
Longitud del pilote (H)	=	25	m
Diámetro del pilote (D)	=	0.50	m
Longitud del encepado del pilote (L)	=	5.25	m
Resistencia característica del hormigón (f'c)	=	28000	KN/m ²
Límite elástico del acero (fy)	=	24000	KN/m ²
Cuantía de acero (ρ) (ASTHO 2007) ¹³	=	0.002	



DATOS GEOTÉCNICOS

ESTRATO 1:

Espesor del estrato (Z)	=	5 m
Tipo de suelo	=	arena
Ángulo de fricción (ϕ)	=	30
Peso específico (γ)	=	8.5 kN/m ³
Drag and closure resistance (cd)	=	0.1

ESTRATO 2:

Espesor del estrato (Z)	=	5 m
Tipo de suelo	=	arena
Ángulo de fricción (ϕ)	=	42
Peso específico (γ)	=	9 kN/m ³
Drag and closure resistance (cd)	=	0.1

ESTRATO 3

Espesor del estrato (Z)	=	5 m
Tipo de suelo	=	arcilla
Cohesión (C)	=	20 kN/m ²
Peso específico (γ)	=	5 kN/m ³
Deformación unitaria al 50% de Pu	=	0.02
Drag and closure resistance (cd)	=	0.1

ESTRATO 4:

Espesor del estrato (Z)	=	10 m
Tipo de suelo	=	arena
Ángulo de fricción (ϕ)	=	44
Peso específico (γ_a)	=	10 kN/m ³
Drag and closure resistance (cd)	=	0.1

Figura 4.26 INGRESO DE DATOS ESTRUCTURALES Y GEOTÉCNICOS

DATOS GENERALES

Micropilote Individual Micropilotes en Grupo

Díámetro del pilote (D)

Nivel del cabezal del pilote (La)

Espesor del cabezal (h)

Separación entre pilotes (s)

Longitud del pilote (H)

Longitud del encepado (cabezal) del pilote (L)

Resistencia característica del hormigón (F_c)

Cantidad de acero (ρ)

Peso específico del pilote (W)

Carga axial (P)

Número de pilotes (n)

CORTE A - A'
DIAMETRO DEL PILOTE

Barras de acero

PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DEL SUELO

CUATRO

PROPIEDADES DEL SUELO PARA ELEMENTOS P-Y Y T-Z

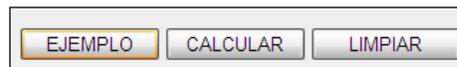
Espesor del estrato (Z)	Tipo de suelo	Cohesión C (KPa) / Angulo de fricción (Φ)	Peso específico γ (KN/m ³)	Drag and closure resistance (cd)	Deformación unitaria al 50% de Pu
5	ARENA	30	8.5	0.1	
5	ARENA	42	9	0.1	
5	ARCILLA	20	5	0.1	0.01
10	ARENA	44	10	0.1	

Nota.- En el cálculo de los elementos T_z se utiliza un ángulo de fricción delta δ que es igual a $2/3$ del ángulo de fricción normal del suelo ϕ . Por otra parte si el tipo de terreno es arena entonces no será necesario ingresar el valor de la deformación unitaria al 50% de p_{ult} , por lo que esta casilla se deshabilitará para prevenir cualquier error.

Paso 2: Ejecución del programa

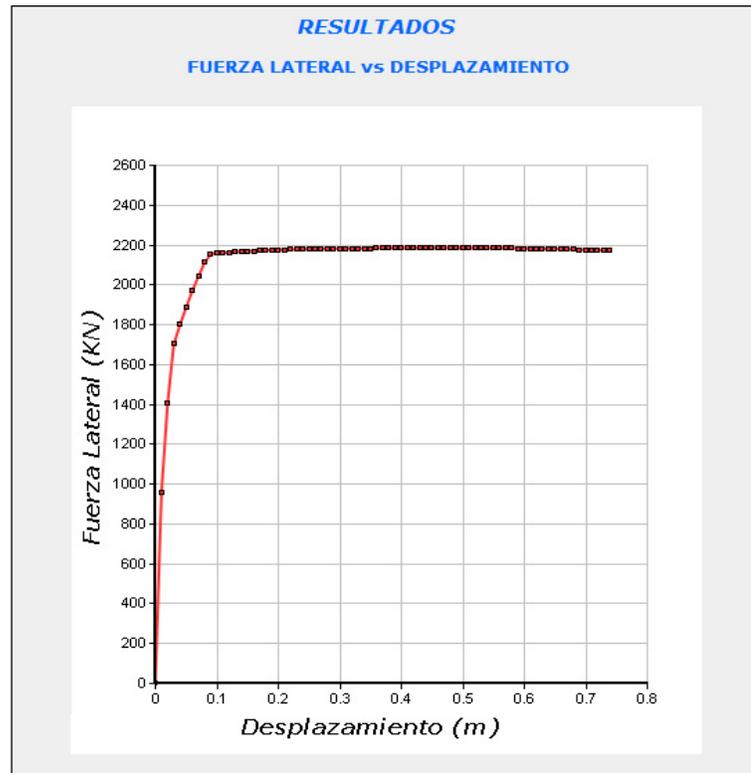
Luego se enviará a **CALCULAR** (Fig. 4.27).

Figura 4.27 BOTÓN QUE DA INICIO AL CÁLCULO, EJECUTAR UN EJEMPLO O LIMPIAR LOS DATOS PARA UN NUEVO PROYECTO



En esta etapa los datos que han sido digitados serán enviados al **CLUSTER** (conjunto de varios computadores trabajando en paralelo para aumentar la capacidad de procesamiento de datos) para realizar los cálculos pertinentes mediante el programa *OpenSees* quien será el encargado de realizar las operaciones internamente y luego enviará los resultados del análisis de vuelta a la interfaz web que serán representados en una gráfica fuerza – desplazamiento (Fig. 4.28).

Figura 4.28 RESULTADOS DEL ANÁLISIS



Esta herramienta muestra una gráfica fuerza – desplazamiento en la que se puede visualizar la capacidad lateral del sistema suelo – pilote a medida que se aplica una carga incremental hasta llegar a un desplazamiento de *0.80 m*.

CAPITULO V

5 EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS Y DISEÑO

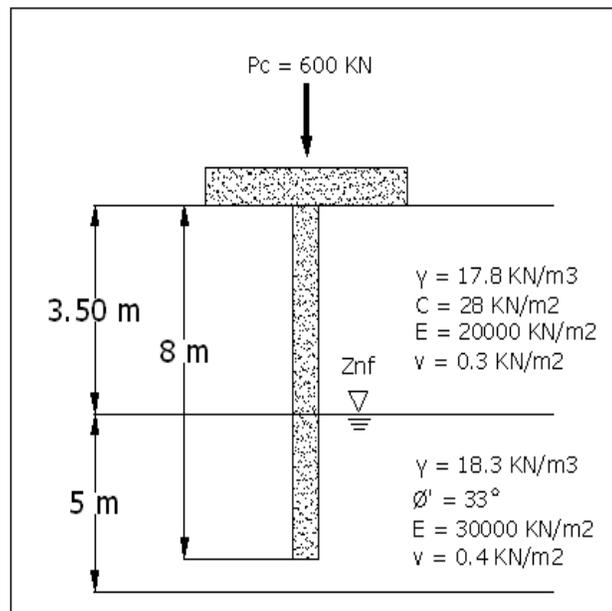
5.1 EJEMPLOS DE DISEÑO

EJEMPLO 1

Un micropilote de diámetro $D = 0.20 \text{ m}$ y longitud $L = 8 \text{ m}$ soporta una carga vertical a compresión $P_c = 600 \text{ KN}$ (Fig 5.1), El elemento se encuentra en suelos arcillosos y con un nivel freático a 3.50 m de la superficie del suelo, el peso específico del hormigón con el que está hecho el micropilote es de 24 KN/m^3 cuyo hormigón será ingresado con una presión 0.3 MPa . Determinar:

- La resistencia por fuste, por punta y la resistencia última frente al hundimiento.
- Comprobar la resistencia frente al arranque, si el esfuerzo axial a tracción es $P_t = 100 \text{ KN}$. Escoger el factor de seguridad suponiendo que trabaja a compresión y tracción.
- Verificar si la cimentación resiste las cargas impuestas o de lo contrario realizar el cálculo mediante micropilotes en grupo, calcular cual es la eficiencia de grupo, y la resistencia última frente al hundimiento en grupo de micropilotes utilizar un factor para calcular la separación entre micropilotes $sd = 2.5$.
- Calcular el asentamiento que podría experimentar la cimentación frente a las cargas impuestas, tanto para el micropilote individual como para el grupo.

Figura. 5.1 DIAGRAMA DEL MICROPILOTE CARGADO.



LITERAL (a) y (b)

Ingresar al laboratorio virtual www.utpl.edu.ec/vleg, luego se procederá a ingresar a las herramientas correspondientes de acuerdo a lo requerido en el ejercicio, en este caso a “Comprobación Frente al Hundimiento”, y procedemos a ingresar los datos conforme a lo indicado en el capítulo III.

Ingresamos los datos tanto estructurales como geotécnicos (Fig.5.2)

El coeficiente kr es **1**, y como se trata de una cimentación nueva los coeficientes F_c y F_ϕ son por tanto **1.5**.

Figura. 5.2 INGRESO DE DATOS INICIALES.

DATOS ESTRUCTURALES

Carga axial a compresión (P_c)
 Diámetro nominal del micropiloto (D)
 Longitud enterrada del micropiloto (L)
 Peso específico del Hormigón (P_h)
 Factor de rozamiento terreno-fuste (k_r) ($2/3$ si $k_r < 1$)
 Presión de inyección (Pi) (Si es a gravedad $P_i=0$)
 Coeficiente de minoración (F_c, F_ϕ) Nueva cimentación = 1.5

DATOS GEOTECNICOS

Número de Estratos:

Espesor del estrato $Z(m)$	Ángulo de fricción ϕ°	Cohesión c (KN/m²)	Peso específico γ (KN/m³)
<input type="text" value="3.50"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="28"/>	<input type="text" value="17.8"/>
<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="33"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="18.3"/>

En el siguiente paso se activan las condiciones para calcular la resistencia última al hundimiento por fuste y por punta, y la activación de la condición referente al nivel freático (Fig. 5.3).

Figura. 5.3 OPCIONES

Considerar resistencia por punta
 Considerar empotramiento en roca
 Considerar nivel freático

Profundidad del nivel freático (Z_{nf})

Como también se pide calcular la resistencia frente al arranque que tendría el micropiloto, entonces activamos la opción correspondiente a ese cálculo (Fig 5.4).

Figura. 5.4 COMPROBACIÓN FRENTE AL ARRANQUE.

COMPROBACIÓN FRENTE AL ARRANQUE

Carga axial a tracción (P_t)
 Coeficiente de seguridad según la disponibilidad de las cargas sobre el micropiloto (n)



Luego de haber ingreso los datos correspondientes procedemos a y obtenemos los resultados más relevantes correspondientes a cada estrato (Fig. 5.5.)

Figura. 5.5 RESULTADOS PREVIOS.

RESULTADOS MICROPILOTE INDIVIDUAL:			
	Esfuerzo Vertical $\sigma_v(z)$ (KN/m ²)	Esfuerzo Horizontal $\sigma_H(z)$ (KN/m ²)	Resistencia Unitaria por Fuste f (KN/m ²)
estrato 1	62.3	62.3	18.667
estrato 2	104.75	147.699	63.945
Resistencia por fuste frente a esfuerzos de compresión Qf			41.049 KN
Resistencia por punta frente a esfuerzos de compresión Qp			6.157 KN
Resistencia última frente al hundimiento (Qu)			47.206 KN
La resistencia última frente al hundimiento no es satisfactorio, se recomienda incrementar el diametro o realizar la cimentación en grupo.			
Si la cimentación es en grupo se recomienda (num = Pc+W/Qu) num = 13 micropilotes. Donde W es el peso del elemento			
RESULTADOS COMPROBACIÓN FRENTE AL ARRANQUE:			
Area lateral del micropilote (Al)			5.027 m ²
Rozamiento unitario por fuste frente a esfuerzos de tracción (ft)			49.567 KN/m ²
Resistencia del micropilote frente a esfuerzos de tracción (Qft)			249.173 KN
Resistencia última frente al arranque (Qar)			254.2 KN
La resistencia última frente al arranque es satisfactoria			

Vemos que la resistencia frente al arranque de 254.2 KN es satisfactoria, no obstante la resistencia última frente al hundimiento 47.206 KN la cual es menor que la carga impuesta de 600 KN, para lo cual se presenta un mensaje en el cual propone dos recomendaciones, hemos de elegir la de realizar la cimentación en grupo lo cual nos indica que necesitaremos 13 micropilotes. Pero hay que tomar en cuenta que trabajar con el número de micropilotes indicado no siempre nos va a dar buenos resultados, esto es porque la resistencia última de grupo se conseguirá multiplicando la carga última por hundimiento del micropilote individual por el número de elementos y por la eficiencia de grupo que es un porcentaje por lo general menor al 100% cuyo valor reduce la carga de de hundimiento en grupo pues se considera un factor de seguridad. Claro que se podría incrementar el diámetro pero este no es el caso.

LITERAL (b)

Luego de lo indicado se tomarán 15 micropilotes los cuales se distribuirán 3 por fila y 5 por columna. Seguidamente se procederá a habilitar la opción para el ingreso de datos correspondientes al hundimiento en grupo (Fig. 5.6), para ello se utilizará la norma Española.

Figura. 5.6 COMPROBACIÓN DEL HUNDIMIENTO EN GRUPO.

<input checked="" type="checkbox"/> COMPROBAR HUNDIMIENTO EN GRUPO DE MICROPILOTES	
Ecuación utilizada para calcular la eficiencia de grupo	NORMA ESPAÑOLA (GRUPO DE LOS ANGELES)
Número de micropilotes por fila (m)	3
Número de micropilotes por columna (n)	5
Factor para calcular el espaciamiento entre micropilotes (sd) sd = 2.5 a 4	2.5

Se procede a presionar el botón  y obtenemos los resultados (Fig. 5.7).

Figura. 5.7 RESULTADOS DE LA RESISTENCIA AL HUNDIMIENTO EN GRUPO.

RESULTADOS MICROPILOTES EN GRUPO:	
Distancia centro a centro entre micropilotes (s)	0.5 m
Eficiencia de grupo en micropilotes (η)	86.045 %
Resistencia última frente al hundimiento en grupo (Qhg)	609.276 kN
La resistencia última frente al hundimiento en grupo es satisfactoria	

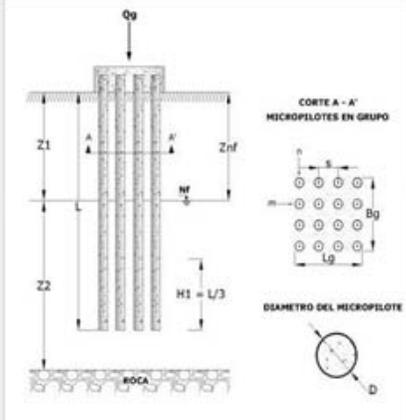
Como podemos ver la distancia centro a centro entre micropilotes es de 0.5 m su eficiencia de grupo del 86.045 % y la resistencia última frente al hundimiento en grupo es de 609.276 kN que es mayor a la carga impuesta inicialmente de 600 kN. Por lo tanto en la parte inferior un mensaje indicará que el cálculo es satisfactorio.

LITERAL (c)

Como la cimentación será en grupo, se realizará el análisis mediante la herramienta que corresponde a dicho análisis “Asientos de Micropilotes en Grupo” (Fig. 5.8).

Figura. 5.8 INGRESO DE DATOS CORRESPONDIENTES A ASIENTO EN GRUPO.

DATOS DE CÁLCULO			
Carga axial aplicada al grupo de micropilotes (Qg)	600 kN		
Díametro del micropilote individual (D)	0.20 m		
Longitud del los micropilotes (L)	8 m		
Número de micropilotes por fila (m)	3		
Número de micropilotes por columna (n)	5		
Factor para calcular el espaciamiento entre micropilotes (sd) sd = 2.5 a 4	2.5		
Asiento del micropilote aislado (So) sometido a una carga axial igual a la media de las que corresponden a cada uno de los pilotes del grupo	12.50 mm Ir a Asientos Individuales		
PROPIEDADES DEL SUELO			
Número de Estratos: DOS			
	Espejor del estrato Z (m)	Módulo de Poisson ν	Módulo de Elasticidad del Terreno E (kN/m ²)
Estrato 1	3.50	0.3	20000
Estrato 2	5	0.4	30000



The diagram shows a vertical cross-section of a micropile group. It includes labels for the total load Qg, the diameter D, the length L, and the spacing s. It also shows the soil layers with their respective moduli of elasticity E and Poisson's ratio nu. A cross-section A-A' shows the arrangement of micropiles in a 3x5 grid. A detail of a single micropile shows its diameter D.

Para ingresar el asiento del micropilote aislado se deberá ingresar al link que se encuentra en la parte derecha donde se ingresa el dato [Ir a asiento individual](#) y la

carga que se deberá ingresar será igual a la media de la que corresponde al grupo de 15 micropilotes, o sea $600 \text{ KN}/15 = 40 \text{ KN}$ (Fig. 5.9).

Figura. 5.9 CALCULANDO EN ASIENTO INDIVIDUAL.

MICROPILOTE EN TERRENO COHESIVO
 MICROPILOTE EN TERRENO GRANULAR

DATOS ESTRUCTURALES:

EMPOTRAMIENTO EN TERRENO GRANULAR

Carga axial a compresión (Pc) KN

Resistencia última del micropilote frente al hundimiento (Qu) KN 1.8 hundimiento

Diametro del micropilote (D) m

RESULTADOS EN SUELO GRANULAR

Asiento del micropilote sometido al esfuerzo Pc (SNG) mm

CORTE A - A'
DIAMETRO DEL MICROPILOTE

Como resultado tenemos 12.50 mm, los cuales serán ingresados en la casilla correspondiente a asiento en grupo (Fig. 5.8).

Regresamos a la herramienta correspondiente a asiento en grupo y luego de haber ingresado el dato del micropilote aislado y el resto de datos geotécnicos, procedemos a calcular y obtenemos los siguientes resultados (Fig.5.10).

Figura. 5.10 RESULTADOS RESPECTO AL HUNDIMIENTO EN GRUPO.

RESULTADOS:

Longitud del encepado (Lg) m

Base del encepado (Bg) m

Modulo de poisson equivalente (V equiva)

Módulo de Elasticidad medio equivalente del Terreno (Em) KN/m²

Distancia centro a centro entre micropilotes (s) m

Asiento del grupo (Sg) mm

Como resultados tenemos que el asiento total es de 13.565 mm, lo que está dentro del límite que es de 2.5 cm.

EJEMPLO 2.

Un micropilote de 0.15 m de diámetro exterior que corresponde a una armadura tubular de acero de 1 cm de espesor y 10 m de longitud se encuentra embebido en el terreno, el micropilote tendrá 3 barras de acero de 10 mm de diámetro. Determinar:

- (a) La resistencia a compresión y tracción del micropilote si la carga es de 340 KN y 110 KN respectivamente, con una sección total de las barras de acero de 0.000236 m^2 , la sección neta de hormigón es de 0.0152 m^2 , el límite elástico tanto para la armadura tubular como para las barras de acero es de 240 MPa y la resistencia característica del hormigón es de 28 MPa . La reducción del espesor de la armadura tubular por efectos de la corrosión será de 0.3 mm , los coeficientes γ_s , γ_a y γ_c se tomarán de acuerdo a lo dispuesto por MFOM, los coeficientes $F_{u,c}$ y $F_{u,t}$ serán de 0.5 , F_e igual a 1.00 y el factor empírico de pandeo será igual 1.00 . A más de ello calcular el tope estructural del micropilote según Jiménez Salas.
- (b) Calcular la resistencia a flexión y cortante si el momento aplicado al elemento es de 10 KN y el esfuerzo cortante es de 80 KN . Verificar cual sería la resistencia estructural frente a esfuerzos combinados.

LITERAL (a).

Ingresamos a la herramienta correspondiente a “Resistencia Estructural a Compresión y Tracción” e ingresamos todos los datos necesarios para el análisis (Fig 5.11).

Figura. 5.11 INGRESO DE DATOS ESTRUCTURALES CORRESPONDIENTES AL MICROPILOTE.

DATOS ESTRUCTURALES:	
Carga axial a compresión (P_c)	340 EN
Carga axial a tracción (P_t)	110 EN
Diámetro exterior nominal de la armadura tubular (d_e)	0.15 m
Diámetro interior nominal de la armadura tubular (d_i)	0.14 m
Sección neta de la lechada de mortero (A_c)	0.0152 m^2
Sección total de las barras de acero (A_s)	0.000236 m^2
Límite elástico de las barras de acero (f_{sk})	240 MPa
Límite elástico de la armadura tubular (f_y)	240 MPa
Resistencia característica del mortero a los 28 días (f_c)	28 MPa
Reducción de espesor de la armadura por efecto de corrosión (r_c)	0.3 mm
Coefficiente parcial de seguridad para el acero (γ_s) Según MFOM $\gamma_s = 1.15$	1.15
Coefficiente parcial de seguridad para armadura tubular (γ_a) Según MFOM $\gamma_a = 1.10$	1.1
Coefficiente parcial de seguridad para el mortero (γ_c) Según MFOM $\gamma_c = 1.30$	1.5
Coefficiente de minoración del área de la armadura tubular en función del tipo de unión (compresión $F_{u,c}$) y (tracción $F_{u,t}$)	0.5
Coefficiente en función del tipo de terreno (F_e)	1
Factor Empírico de pandeo (R)	1

Como se pide determinar cuál será el tope estructural del micropilote se procede a habilitar la opción correspondiente a dicho cálculo y a elegir la fórmula correspondiente. (Fig. 5.12).

Figura. 5.12 TOPE ESTRUCTURAL.

TOPE ESTRUCTURAL
Tipo de ecuación : jimenez Salas

Como ya se ha ingresado todos los datos necesarios para el análisis de la resistencia estructural, se procede a presionar el botón calcular y obtenemos los siguientes resultados. (Fig 5.13).

Figura. 5.13 RESULTADOS CORRESPONDIENTES A LA RESISTENCIA ESTRUCTURAL A COMPRESIÓN Y TRACCIÓN.

RESULTADOS:

Resistencia estructural del micropilote sometido a esfuerzos de compresión (Qec)	436.258 KN
Resistencia estructural del micropilote sometido a esfuerzos de tracción (Qet)	256.666 KN
Tope estructural (T)	0.348 MN

La resistencia estructural frente a esfuerzos de compresión es satisfactoria ($Qec \geq Pc$)
La resistencia estructural frente a esfuerzos de tracción es satisfactoria ($Qet \geq Pt$)

De acuerdo a los resultados observamos que los materiales del micropilote son adecuados, puesto que la resistencia frente a compresión y tracción del pilote son mayores que las que están actuando sobre el elemento.

LITERAL (b).

Para el siguiente análisis procedemos a abrir la herramienta correspondiente a "Resistencia Estructural a Flexión y Cortante", y de igual forma ingresamos los datos correspondientes. (Fig 5.14).

Figura. 5.14 INGRESO DE DATOS CORRESPONDIENTES A RESISTENCIA ESTRUCTURAL A FLEXIÓN Y CORTANTE.

DATOS ESTRUCTURALES:

Momento flector (M)	10 KN ² m
Esfuerzo cortante (V)	80 KN/m ²
Díámetro exterior nominal de la armadura tubular (de)	0.15 m
Díámetro interior nominal de la armadura tubular (di)	0.14 m
Reducción de espesor de la armadura por efecto de corrosión (re)	0.3 mm
Límite elástico del acero de la armadura tubular (fy)	240 MPa
Coefficiente parcial de seguridad para armadura tubular (ya) Según NFDN ya = 1.18	1.1
Coefficiente de minoración del módulo resistente de la armadura tubular en función del tipo de unión (Fu, f) Según NFDN Fu, f = 0.58	0.5

Con estos datos procedemos a dar paso al análisis (Fig. 5.15).



Figura. 5.15 RESULTADOS CORRESPONDIENTES A FLEXIÓN Y CORTANTE.

RESULTADOS:	
Sección reducida de la armadura tubular de acero por efecto de la corrosión (Apr)	0.0021 m ²
Módulo plástico de la sección (Wpp)	0.0000984 m ³
Módulo elástico de la sección (Wep)	0.0000749 m ³
Resistencia última de la sección a cortante (Qcortante)	168.406 KN
Momento máximo que resiste la sección a flexión (Qflexión)	10.735 KN*m
El momento máximo que resiste la sección a flexión es satisfactoria	
La resistencia de cálculo de la sección a cortante es satisfactoria	

Los resultados son satisfactorios ya que los valores calculados son mayores que los que están aplicados al elemento.

Como se desea comprobar la resistencia estructural frente a esfuerzos combinados, se procede a habilitar la opción correspondiente (Fig. 5.16).

Figura. 5.16 OPCIÓN PARA CALCULAR ESFUERZOS COMBINADOS.

Considerar resistencia estructural frente a esfuerzos combinados (flexión y tracción)

El único resultado que cambiaría es el del momento ya que se estima que el elemento está trabajando a flexión frente a la interacción del esfuerzo cortante (Fig. 5.17).

Figura. 5.17 RESULTADOS CORRESPONDIENTES A FLEXIÓN Y CORTANTE, TOMANDO EN CUENTA ESFUERZOS COMBINADOS.

RESULTADOS:	
Sección reducida de la armadura tubular de acero por efecto de la corrosión (Apr)	0.0021 m ²
Módulo plástico de la sección (Wpp)	0.0000984 m ³
Módulo elástico de la sección (Wep)	0.0000749 m ³
Resistencia última de la sección a cortante (Qcortante)	168.406 KN
Momento máximo que soporta la sección a flexión, teniendo en cuenta la interacción del esfuerzo cortante (Qvflexión)	10.735 KN*m
La resistencia de cálculo de la sección a cortante es satisfactoria	
El momento máximo frente a esfuerzos combinados (flexión y cortante) es satisfactoria	

El momento máximo de la sección a flexión, teniendo en cuenta la interacción del esfuerzo cortante ($Q_{vflexión}$) es de 10.735 KN*m, cuyo valor es igual al momento máximo que resiste la sección a flexión ($Q_{flexión}$) ya que el esfuerzo cortante V es menor a $0.5Q_{cortante}$.

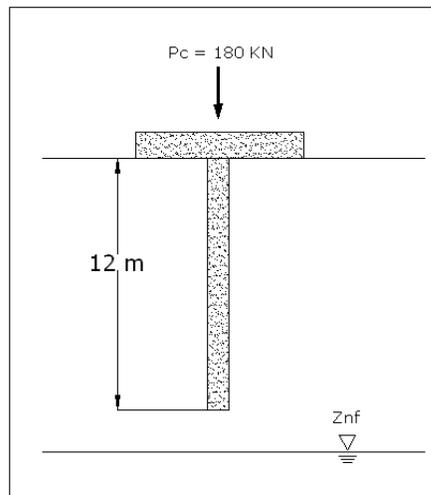
EJEMPLO 3.



Un micropilote conformado únicamente de hormigón tiene 12 m de longitud cuyo diámetro exterior $D = 0.10$ m y está sometido a una carga $P_c = 180$ KN (Fig 5.18). El nivel freático se encuentra por debajo de la punta del elemento. Determinar:

La resistencia estructural a compresión, si la resistencia característica del hormigón a los 28 días es de 28 MPa, cuyo coeficiente parcial de seguridad para el hormigón $\gamma_c = 1.5$, $R = 1$, el coeficiente $F_{u,c} = 0.5$ por no tener armadura. Verifique si resiste la carga impuesta o de lo contrario dar solución para que este lo haga.

Fig. 5.18 Diagrama del micropilote cargado



En la herramienta correspondiente a “Resistencia Estructural a Compresión y Tracción” ingresamos los datos necesarios para este cálculo (Fig. 5.19).

Para los factores $F_{u,c}$ y $F_{u,t}$ se utilizó el valor correspondiente a “resto de casos” con un valor de 0.5.

Figura. 5.19 DATOS DE INGRESO.

DATOS ESTRUCTURALES:	
Carga axial a compresión (Pc)	180 KN
Carga axial a tracción (Pt)	0 KN
Diámetro exterior nominal de la armadura tubular (de)	0.10 m
Diámetro interior nominal de la armadura tubular (di)	0 m
Sección neta de la lechada de mortero (Ac)	0.007854 m ²
Sección total de las barras de acero (As)	0 m ²
Límite elástico de las barras de acero (fsh)	0 MPa
Límite elástico de la armadura tubular (fy)	0 MPa
Resistencia característica del mortero a los 28 días (F'c)	28 MPa
Reducción de espesor de la armadura por efecto de corrosión (re)	0 mm
Coficiente parcial de seguridad para el acero (ys) Según MFOM ya = 1.15	1
Coficiente parcial de seguridad para armadura tubular (yt) Según MFOM ya = 1.10	1
Coficiente parcial de seguridad para el mortero (yc) Según MFOM yc = 1.30	1.5
Coficiente de minoración del área de la armadura tubular en función del tipo de unión (compresión Fu,c) y (Tracción Fu,t)	0.5
Coficiente en función del tipo de terreno (Fe)	1.3
Factor Empírico de pandeo (R)	1

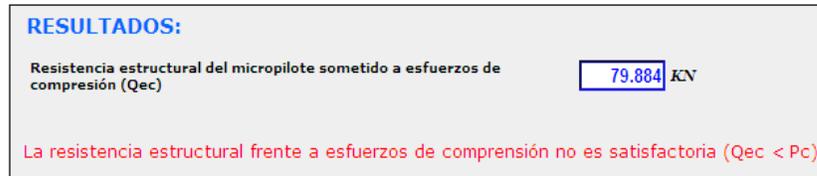
La sección neta de la lechada de mortero queda definida por el diámetro. Los valores que se encuentran en cero son por que el elemento no lleva armadura tubular ni



barras de acero. En los valores para los coeficientes tanto para la armadura como para las barras tienen un valor de 1, como ya se lo indico en el capítulo 3 referente al manual para esta herramienta.

El resultado correspondiente a la resistencia a compresión del micropilote se lo puede apreciar en la (Fig 5.20).

Figura. 5.20 DATOS DE INGRESO



Vemos que la resistencia estructural a compresión es de **79.884 kN**, la cual es menor que la que está soportando el elemento por lo que podría llegar a producirse un fallo estructural en el elemento.

Como resultado de ello se recomienda aumentar el diámetro o en su defecto realizar el cálculo para un grupo de 3 micropilotes, así la carga de **180 kN** se repartiría a **60 kN** para cada elemento.

5.2 ANÁLISIS PARAMÉTRICO

Otra ventaja de esta herramienta es desarrollar análisis paramétricos, los cuales consisten en variar cierto parámetro que interviene en el análisis y observar el impacto que este posee mediante la variación de un solo parámetro como es el comportamiento del micropilote frente a varios agentes externos y como varían los resultados mediante una grafica donde se muestra el análisis correspondiente.

EJEMPLO 1:

A partir de la herramienta “Comprobación frente al hundimiento” vamos a verificar el impacto que tiene el diámetro a la hora de analizar la resistencia por fuste sin variar los demás parámetros como son la longitud, el nivel freático y las características del suelo. La longitud $L = 13 m$, el nivel freático $Nf = 3 m$ desde la superficie y una carga $P_c = 700 kN$.

DATOS GEOTÉCNICOS:

Z (m)	ϕ_i'	C_i' (kN/m ²)	γ_{is} (kN/m ³)
3,00	0	30.00	18.00
5,00	0	30.00	18.00
5,00	34	0.00	17.20



D (m)	Qf (KN)
0.10	326.813
0.12	392.148
0.14	457.463
0.16	522.798
0.18	588.113
0.20	653.645
0.22	718.960
0.24	784.295
0.26	849.610
0.28	914.945
0.30	980.261

Conclusión: La gráfica muestra un incremento directamente proporcional del diámetro frente a la resistencia por fuste, ya que la resistencia por fuste depende directamente del diámetro.

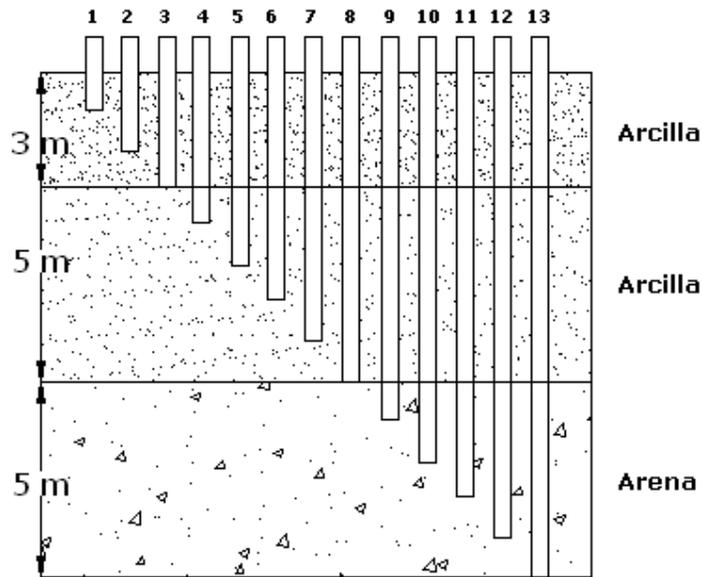
EJEMPLO 2:

A partir de la herramienta “Comprobación frente al hundimiento” vamos a verificar el impacto que tiene la longitud L hacia la resistencia por fuste sin variar los demás parámetros como son la longitud, el nivel freático y las características del suelo. La longitud $D = 0.25 \text{ m}$, el nivel freático $Nf = 3 \text{ m}$ desde la superficie. (Fig.4.21) y una carga $Pc = 700 \text{ KN}$.

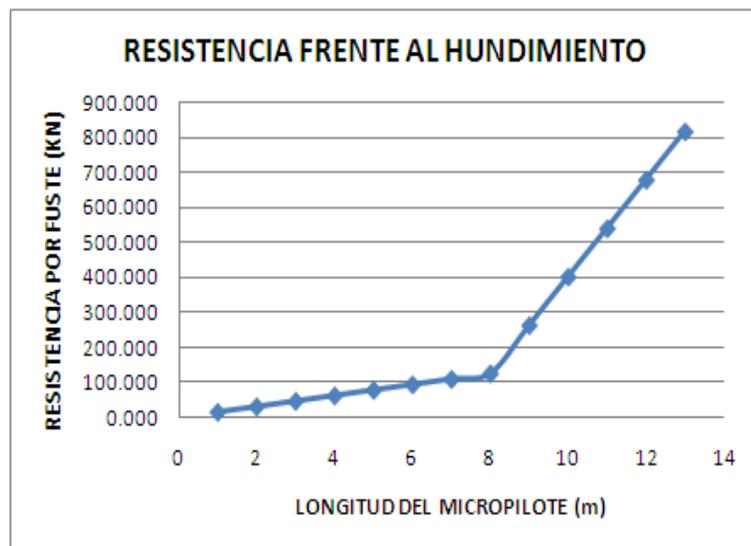
DATOS GEOTÉCNICOS:

Z (m)	ϕ_i'	C_i' (KN/m ²)	γ_{is} (KN/m ³)
3,00	0	30.00	18.00
5,00	0	30.00	18.00
5,00	34	0.00	17.20

Figura. 4.21 DIAGRAMA DEL MICROPILOTE EN SECUENCIA



L (m)	Qf (KN)
1	15.700
2	31.420
3	47.120
4	62.820
5	78.540
6	94.240
7	109.960
8	125.660
9	263.848
10	402.212
11	540.400
12	678.765
13	816.953



Conclusión: Se observa que conforme aumenta la longitud del micropilote la resistencia por fuste también lo hace en una forma directamente proporcional, esto se genera en toda la gráfica. El punto en donde la recta toma un incremento pero igualmente directamente proporcional es debido a que para esa profundidad existe una arena con un ángulo de fricción de 34° , el cual proporciona una resistencia por fuste mayor a la de los demás estratos.

EJEMPLO 3:



A partir de la herramienta “Resistencia estructural a compresión y tracción” vamos a verificar el impacto que tendría la resistencia del mortero frente a la resistencia estructural a compresión. Únicamente se variara la resistencia del mortero a los **28** días de **21** a **35 MPa** sin variar los demás parámetros, el límite elástico del acero tanto para las barras como para la armadura tubular es de **420 MPa** con un espesor de **1 cm** y una carga **Pc = 1000 KN**,

f'c (Mpa)	Q _{ec} (KN)
21	2798.32
22	2825.14
23	2851.97
24	2878.79
25	2905.61
26	2932.43
27	2959.26
28	2986.08
29	3012.90
30	3039.72
31	3066.54
32	3093.37
33	3120.19
34	3147.01
35	3173.83



Conclusión: La gráfica muestra un incremento directamente proporcional de la resistencia característica del mortero a los *28 días* frente a la resistencia estructural a compresión del micropilote, esto se debe a que si se aumenta la resistencia del hormigón aumenta la resistencia del micropilote a compresión debido a que el hormigón es diseñado para que soporte cargas a compresión y lo que hace este material es resistir más esfuerzos axiales si se aumenta la resistencia.

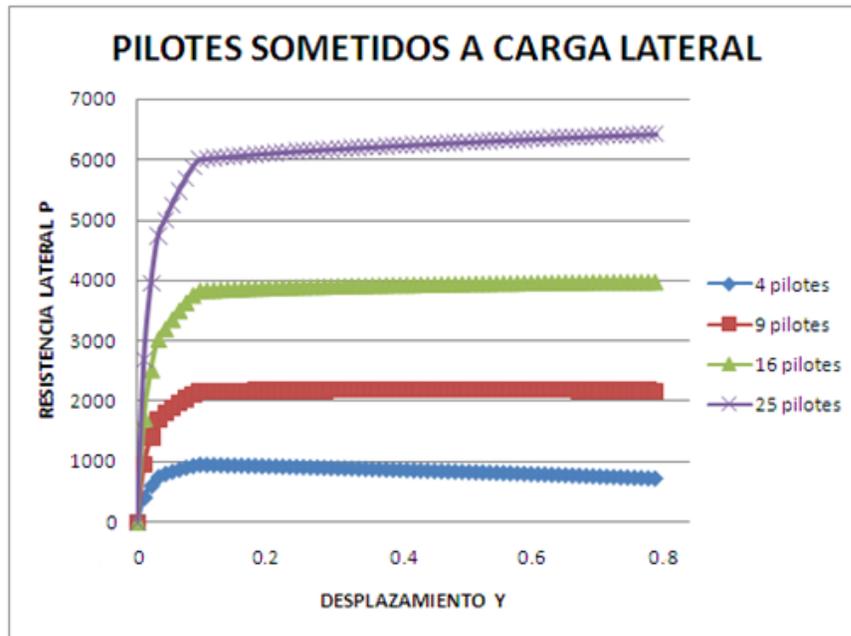
EJEMPLO 4:

A partir de la herramienta “Capacidad de carga lateral” vamos a verificar el impacto que tendría el aumento de pilotes en una cimentación frente a un desplazamiento lateral incremental. Únicamente se variará el número de pilotes en el grupo dejando estáticos los demás parámetros, **D = 0.50**, **L = 25**, **P = 1000**, **f'c = 28MPa** y una separación entre pilotes **s = 1.25 m**

# PILOTES	RESISTENCIA
-----------	-------------



	LATERAL ULTIMA (KN)
4	950.40
9	2181.75
16	3981.01
25	6416.31



Conclusión: La gráfica muestra lógicamente un incremento en la resistencia lateral con forme se aumenta el número de pilotes ya que el aumento de de elementos en el grupo genera una resistencia mayor de la cimentación hacia el suelo haciendo que soporte mayores desplazamientos.

CAPITULO VI



6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del estudio y la implementación de la herramienta “Diseño de Micropilotes” y con base en los objetivos planteados revisados en el capítulo uno que sirvieron como meta en el desarrollo de la presente tesis, se ha podido llegar a obtener las siguientes conclusiones y recomendaciones.

CONCLUSIONES:

- Según lo revisado y estudiado, los micropilotes son efectivos si se los diseña para que trabajen en grupo, esto debido a su geometría y a la poca resistencia que brindan si se los diseña para que trabajen individualmente.
- La herramienta de diseño “Resistencia Frente al Hundimiento” permite trabajar con cualquier tipo de suelo homogéneo o heterogéneo ya que las ecuaciones del método empleado utiliza las características del suelo individualmente por estratos.
- Estas herramientas reduce el tiempo de cálculo de una manera más eficaz y rápida al momento de diseñar cimentaciones mediante micropilotes.
- La resistencia estructural del micropilote a cortante no será la misma que la resistencia lateral puesto que en la resistencia estructural se toma en cuenta solo la armadura tubular mientras que en la capacidad lateral se incorporan las características del suelo y la longitud del elemento así como también la resistencia del hormigón y el peso específico del mismo, por lo que varían sus resultados considerablemente entre el uno y el otro.
- La resistencia lateral última del pilote varía de acuerdo al número de pilotes y las características geotécnicas del suelo y estructurales del elemento.
- Las herramientas de diseño de micropilotes permitirán mejorar los métodos de enseñanza - aprendizaje dentro del estudio de cimentaciones profundas.

RECOMENDACIONES:

- Se recomienda investigar sobre otros métodos relacionados con el cálculo de micropilotes y realizar una comparación entre ellos para observar cual da resultados más confiables.
- Se recomienda modificar el código de todas las herramientas para que en estas se puedan considerar más de cuatro estratos.
- Esta herramienta solo considera el cálculo de micropilotes verticales por lo que se recomienda que se incorpore el cálculo de micropilotes inclinados.
- Se recomienda que antes de utilizar la herramienta se lea el manual, y se siga el procedimiento conforme a lo indicado para evitar futuros problemas en los resultados.

CAPITULO VII



7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Antonio Ros Esteban; PROYECTO DE FIN DE CARRERA; Pilotes y micropilotes (Capítulo 13).
2. Manuel Romana Ruiz (Junio 2003); “II CURSO SOBRE RECACES, INCLUCIONES, INYECCIONES Y JET-GROUTING”, y Rodriguez Ortiz (1984).
3. Secretaría de Estado de Infraestructuras y Planificación de España del Ministerio de Fomento (MFOM) (Octubre 2005); GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA.
4. Jorge E. Alva Hurtado, PhD; CIMENTACIONES PROFUNDAS; CISMID-FIC-UNI.
5. Braja M. Das, PRINCIPIOS DE INGENIERÍA DE CIMENTACIONES, 4^{ta} edición, México.
6. American Concrete Institute; REQUISITOS DE REGLAMENTO PARA CONCRETO ESTRUCTURAL Y COMENTARIO (ACI 318S-05).
7. Dirección General de carreteras – España (2002), GUÍA DE CIMENTACIONES EN OBRAS DE CARRETERAS.
8. Documento Básico SE-C, SEGURIDAD ESTRUCTURAL, BOE 2008.
9. Manjriker Gunaratne, THE FOUNDATION ENGINEERING HANDBOOK, 2006.
10. Youzhi Ma y Nan Deng; BRIDGE ENGINEERING HANDBOOK, DEEP FOUNDATIONS.
11. OpenSees Command Language Manual.
12. AASHTO, 2004; Diseño, evaluación y rehabilitación de puentes por factores de carga y resistencia (LRFD)
13. José M^a Rodríguez Ortiz, Jesús Serra Gesta, Carlos Oteo Mazo; CURSO APLICADO DE CIMENTACIONES; cuarta edición 1989 – España.
14. Development of p-y crves for analysis of laterally loaded piles; Western Washington; WA-RD 153.1, Abril 1988

LINKS

15. Ing. Marco Antonio Boidi, GEOTÉCNIA Y CIMENTACIONES, Rafaela (Sta Fe)-Argentina <http://www.arqa.com/web/usuarios/ingboidi/MICROPILOTES.htm>. Activa.
16. Antonio Ros Esteban, PITOLES Y MICROPILOTES, capítulo 13, <http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/62/16/Cap%C3%ADtulo13.pdf>. Activa.
17. Construmática, EJECUCIÓN DE CIMENTACIONES POR MICROPILOTES, http://www.construmatica.com/construpedia/Ejecuci%C3%B3n_de_Cimentaci%C3%B3n_por_Micropilotes#Empleo_en_Cimentaciones_Nuevas. Activa.
18. http://www.kronsa.com/micropilotes_MK.htm. Activa.
19. Departamento de construcción y vías rurales, Universidad Politécnica de Madrid, PRONTUARIO DE PERFILES DE ACERO, http://www.cvr.etsia.upm.es/web%202005/Construccion%20/Prontuario%2014-04-08_reducido.pdf. Activa.
20. Universidad de Castilla – La Mancha, ESTRUCTURAS DE ACERO, http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/EA_Comprobaciones_p.pdf.



21. JL. Varela e IG. Herrero (2001/2002), Evit Minas Barakaldo, EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO MEDIANTE PENETRÓMETROS, [http://ingenieriageologica.iespana.es/biblioteca/penetrometros/reconocimiento_in_situ\(spt,cpt,dinamico\).pdf](http://ingenieriageologica.iespana.es/biblioteca/penetrometros/reconocimiento_in_situ(spt,cpt,dinamico).pdf). Activa.
22. Manuel Romana Ruiz. MICROPILOTES, Universidad Politécnica de Valencia, Junio 2003. Activa. http://www.stmr.es/recursos/downloads/STMR_Art_MicropilotesUsoRecalces.pdf.
23. Roger Bullivant, MICROPILOTES Y MINI PILOTES, 2009, <http://www.rogerbullivant.es/micropilotes.html>. Activa.
24. Varios documentos referentes a cimentaciones profundas, <http://www.4shared.com/network/search.jsp?sortType=1&sortOrder=1&sortmode=2&searchName=cimentaciones&searchmode=2&searchName=cimentaciones&searchDescription=&searchExtention=&sizeCriteria=atleast&sizevalue=10&start=10>. Activa.
25. Carlos Alonso Cruz Noguez, David Murià Vila y José Camargo Pérez, MÉTODO PARA CALCULAR LAS RIGIDECES Y LOS AMORTIGUAMIENTOS DINÁMICOS DE GRUPO DE PILOTES DE FRICCIÓN, <http://www.smis.org.mx/rsmis/n77/cruz.pdf>. Activa.
26. Pacific Earthquake Research Center (<http://peer.berkeley.edu/>) de la Universidad de California en Berkeley, USA. Activa.